

ИНФОРМАЦИОННЫЕ и РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

2023

Том 6

№ 3

Журнал основан в 2018 г.
Выходит 4 раза в год

Почетный главный редактор

Гуляев Юрий Васильевич — научный руководитель Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, академик, член Президиума РАН (Москва, Россия)

Главный редактор

Вольвач Александр Евгеньевич — доктор физико-математических наук, заместитель директора по научной работе Крымской астрофизической обсерватория РАН (Крым, Россия)

Заместитель главного редактора

Ермолов Павел Петрович — кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Радиоэлектронные системы и технологии» Института радиоэлектроники и интеллектуальных технических систем Севастопольского государственного университета (Севастополь, Россия)

Редакционная коллегия

Абрамов Игорь Иванович — доктор физико-математических наук, профессор кафедры микро- и нанoeлектроники, заведующий научно-исследовательской лабораторией «Физика приборов микро- и нанoeлектроники» Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники (Минск, Беларусь)

Афонин Игорь Леонидович — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Радиоэлектронные системы и технологии» Института радиоэлектроники и интеллектуальных технических систем Севастопольского государственного университета (Севастополь, Россия)

Белкин Михаил Евсеевич — доктор технических наук, профессор, заведующий научно-технологической лабораторией и профессор МИРЭА — Российского технологического университета (Москва, Россия)

Бичурин Мирза Имамович — доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой проектирования и технологии радиоэлектронной аппаратуры Новгородского государственного университета (Великий Новгород, Россия)

Богатырёв Юрий Владимирович — доктор технических наук, главный научный сотрудник Научно-практического центра НАН Беларуси по материаловедению (Минск, Беларусь)

Борисова Нина Александровна — доктор исторических наук, доцент, заместитель директора по науке и технике Центрального музея связи им. А. С. Попова, профессор кафедры инфокоммуникационных систем Санкт-Петербургского университета телекоммуникаций им. профессора М. А. Бонч-Бруевича (Санкт-Петербург, Россия)

Громов Дмитрий Викторович — доктор технических наук, профессор отделения нанотехнологий в электронике, спинтронике и фотонике офиса образовательных программ, главный научный сотрудник центра экстремальной прикладной электроники института нанотехнологий в электронике, спинтронике и фотонике Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» (Москва, Россия)

Гудков Александр Григорьевич — доктор технических наук, профессор кафедры «Технология приборостроения» МГТУ им. Н. Э. Баумана (Москва, Россия)

Запарий Владимир Васильевич — доктор исторических наук, профессор Уральского федерального университета им. первого Президента России Б. Н. Ельцина» (Екатеринбург, Россия)

Запевалов Владимир Евгеньевич — доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией гиротронов для управляемого термоядерного синтеза Института прикладной физики РАН (Нижний Новгород, Россия)

Иванов Вячеслав Элизбарович — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиоэлектроники и телекоммуникаций Института радиоэлектроники и информационных технологий — РТФ Уральского федерального университета им. первого Президента России Б. Н. Ельцина» (Екатеринбург, Россия)

Ipev Dimov Stojce — Professor at University of Johannesburg (South Africa)

Ипатов Александр Васильевич — доктор технических наук, профессор, научный руководитель Института прикладной астрономии РАН (Санкт-Петербург, Россия)

Касьянов Александр Олегович — доктор технических наук, профессор кафедры радиотехнических и телекоммуникационных систем Инженерно-технологической академии Южного федерального университета (Таганрог, Россия)

Колосов Станислав Васильевич — доктор физико-математических наук, профессор кафедры вычислительных методов и программирования Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники (Минск, Беларусь)

Криворучко Юрий Тимофеевич — доктор технических наук, профессор кафедры радиоэлектронных систем Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации (Санкт-Петербург, Россия)

Кураев Александр Александрович — доктор физико-математических наук, профессор кафедры информационных радиотехнологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники (Минск, Беларусь)

Ларионов Михаил Григорьевич — доктор физико-математических наук, заместитель руководителя Астрокосмического центра Физического института им. П. Н. Лебедева (Москва, Россия)

Малютин Николай Дмитриевич — доктор технических наук, профессор кафедры конструирования узлов и деталей радиоэлектронной аппаратуры, директор НИИ систем электрической связи Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (Томск, Россия)

Носков Владислав Яковлевич — доктор технических наук, профессор кафедры радиоэлектроники и телекоммуникаций Института радиоэлектроники и информационных технологий — РТФ Уральского федерального университета им. первого Президента России Б. Н. Ельцина» (Екатеринбург, Россия)

Обухов Илья Андреевич — доктор физико-математических наук, заместитель генерального директора по научной работе НПП «Радиотехника» (Москва, Россия)

Овчинникова Елена Викторовна — доктор технических наук, профессор кафедры 406 Национального исследовательского университета «Московский авиационный институт (Москва, Россия)

Пестриков Виктор Михайлович — доктор технических наук, профессор кафедры аудиовизуальных систем и технологий Санкт-Петербургского государственного института кино и телевидения (Санкт-Петербург, Россия)

Пестряков Александр Валентинович — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Радиооборудование и схемотехника», руководитель научно-исследовательского отдела «Радиотехнические системы и устройства» Московского технического университета связи и информатики (Москва, Россия)

Совлуков Александр Сергеевич — доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Института проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН (Москва, Россия)

Старостенко Владимир Викторович — доктор физико-математических наук, профессор кафедры радиофизики и электроники Физико-технического института Крымского федерального университета им. В. И. Вернадского» (Симферополь, Россия)

Широков Игорь Борисович — доктор технических наук, профессор кафедры «Электронная техника» Института радиоэлектроники и интеллектуальных технических систем Севастопольского государственного университета (Севастополь, Россия)

Международный редакционный совет

Богущ Вадим Анатольевич — доктор физико-математических наук, профессор, ректор Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники (Минск, Беларусь)

Евстигнеев Максим Павлович — доктор физико-математических наук, профессор, проректор по научной деятельности Севастопольского государственного университета (Севастополь, Россия)

Nemai Chandra Karmakar — associate professor at Department of Electrical and Computer Systems Engineering Monash University (Australia)

Новиков Владимир Витальевич — доктор технических наук, профессор кафедры ракетного вооружения надводных кораблей Черноморского высшего военно-морского ордена Красной Звезды училища им. П. С. Нахимова» (Севастополь, Россия)

Содержание

Электроника, фотоника, приборостроение и связь (2.2)

Обухов И. А.	
Полевой транзистор с металлическим затвором	275
Торхов А. Н.	
Исследование внутренней структуры кластеров $[C_{60}@ \{H_2O\}_n]_k$	
гидратированных комплексов фуллерена $C_{60}@ \{H_2O\}_n$ методами АСМ	285
Криворучко Ю. Т., Шатраков Ю. Г.	
Микроволновая система посадки маневренных самолетов	
государственной авиации на принципах когнитивной обработки	294

История науки и техники (5.6.6)

Золотинкина Л. И.	
У истоков отечественной радиоэлектроники	308
Пестриков В. М.	
Успех бизнес-плана компании АТ&Т	327
Кондратова Е. В., Свиридова Е. И., Ермолов П. П.	
Проект IEEE oral history: академик Ю. В. Гуляев. Часть 5	356

INFOCOMMUNICATIONS and RADIO TECHNOLOGIES

2023

Vol. 6

No. 3

The journal was founded in 2018
Published 4 times a year

Honorary Chief Editor

Gulyaev Yury Vasilievich – Scientific Director of the Institute of Radio Engineering and Electronics n. a. V. A. Kotelnikov RAS, academician, member of the Presidium of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia)

Chief Editor

Volvach Alexander Evgenievich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Deputy Director for Research of the Crimean Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences (Crimea, Russia)

Deputy Chief Editor

Yermolov Pavel Petrovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department “Radioelectronic Systems and Technologies” of the Institute of Radioelectronics and Intellectual Technical Systems of Sevastopol State University (Sevastopol, Russia)

Editorial Board

Abramov Igor Ivanovich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department of Micro- and Nanoelectronics, Head of the Research Laboratory “Physics of Micro- and Nanoelectronics Devices” of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Belarus)

Afonin Igor Leonidovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the “Radioelectronic Systems and Technologies” Department of the Institute of Radioelectronics and Intellectual Technical Systems of the Sevastopol State University (Sevastopol, Russia)

Belkin Mikhail Evseevich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Scientific and Technological Laboratory and Professor of MIREA — Russian Technological University (Moscow, Russia)

Bychurin Mirza Imamovich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of the Department of Design and Technology of Radio-Electronic Equipment of Novgorod State University (Veliky Novgorod, Russia)

Bogatyryov Yury Vladimirovich – Doctor of Technical Sciences, Chief researcher of the Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Materials Science (Minsk, Belarus)

Borisova Nina Aleksandrovna – Doctor of Historical Sciences, Associate Professor, Deputy director for science and technology of the Central Museum of Communications n. a. A. S. Popov, Professor of the department of information communication systems of the St. Petersburg University of Telecommunications n. a. Professor M. A. Bonch-Bruevich (St. Petersburg, Russia)

Gromov Dmitry Viktorovich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Nanotechnologies in Electronics, Spintronics and Photonics of the Office of Educational Programs, Chief Researcher of the Center for Extreme Applied Electronics Institute of Nanotechnologies in Electronics, Spintronics and Photonics of the National Research Nuclear University “MEPhI” (Moscow, Russia)

Gudkov Aleksandr Grigoryevich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department “Technology of Instrumentation” of Bauman Moscow State Technical University (Moscow, Russia)

Zapariy Vladimir Vasilievich – Doctor of Historical Sciences, Professor of the Ural Federal University n. a. first President of Russia B. N. Yeltsin (Ekaterinburg, Russia)

Zapevalov Vladimir Evgenyevich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Laboratory of Gyrotrons for Controlled Thermonuclear Fusion at the Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences (Nizhny Novgorod, Russia)

Ivanov Vyacheslav Elizbarovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Radio Electronics and Telecommunications of the Institute of Radio Electronics and Information Technologies – RTF of Ural Federal University n. a. first President of Russia B. N. Yeltsin (Ekaterinburg, Russia)

Ilcev Dimov Stojce — Professor at University of Johannesburg (South Africa)

Ipatov Aleksandr Vasilievich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Scientific Supervisor of the Institute of Applied Astronomy of the Russian Academy of Sciences (St. Petersburg, Russia)

Kasyanov Aleksandr Olegovich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Radio Engineering and Telecommunication Systems of the Engineering and Technology Academy of the Southern Federal University (Taganrog, Russia)

Koloso Stanislav Vasilyevich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department of Computing Methods and Programming of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Belarus)

Krivoruchko Yuri Timofeyevich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Radio-Electronic Systems of the St. Petersburg State University of Civil Aviation (St. Petersburg, Russia)

Kuraev Aleksandr Aleksandrovich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department of Information Radio Technologies of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Belarus)

Larionov Mikhail Grigoryevich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Deputy Head of the Astrocosmic Center of the Physical Institute n. a. P. N. Lebedev (Moscow, Russia)

Malyutin Nikolai Dmitrievich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Designing Components and Parts of Radioelectronic Equipment, Director of the Research Institute of Electrical Communication Systems at Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (Tomsk, Russia)

Noskov Vladislav Yakovlevich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Radio Electronics and Telecommunications of the Institute of Radio Electronics and Information Technologies – RTF of Ural Federal University n. a. first President of Russia B. N. Yeltsin (Ekaterinburg, Russia)

Obukhov Ilya Andreevich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Deputy General Director for Research, Radiotekhnika Co. (Moscow, Russia)

Ovchinnikova Elena Viktorovna – Doctor of Technical Sciences, Professor of Department 406 of the National Research University “Moscow Aviation Institute” (Moscow, Russia)

Pestrikov Victor Mikhailovich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Audiovisual Systems and Technologies of St. Petersburg State Institute of Film and Television (St. Petersburg, Russia)

Pestryakov Alexander Valentinovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Radio Equipment and Circuitry, Head of the Research Department of Radio Engineering Systems and Devices of Moscow Technical University of Communications and Informatics (Moscow, Russia)

Sovlukov Alexander Sergeevich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher of the Institute of Control Problems n. a. V. A. Trapeznikov of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia)

Starostenko Vladimir Viktorovich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department of Radiophysics and Electronics of the Physico-Technical Institute of Crimean Federal University n. a. V. I. Vernadsky (Simferopol, Russia)

Shirokov Igor Borisovich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Electronic Engineering of the Institute of Radio Electronics and Intelligent Technical Systems, Sevastopol State University (Sevastopol, Russia)

International Editorial Council

Bogush Vadim Anatolyevich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Rector of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Belarus)

Evstigneev Maksim Pavlovich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Vice-Rector for Research, Sevastopol State University (Sevastopol, Russia)

Nemai Chandra Karmakar – Associate Professor at Department of Electrical and Computer Systems Engineering Monash University (Australia)

Novikov Vladimir Vitalievich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Missile Weapons of Surface Ships of Black Sea Higher Naval School n. a. P. S. Nakhimov (Sevastopol, Russia)

Address:

Sevastopol State University
33, Universitetskaya str., Sevastopol, 299053, Russian Federation
E-mail: icrt.mail@mail.ru
Website: <http://icrtjournal.com>

Contents

Electronics, photonics, instrumentation and communications

I. A. Obukhov	
Field Effect Transistor with Metal Gate	275
N. A. Torkhov	
AFM Study of the Internal Structure of $[C_{60}@ \{H_2O\}_n]_k$ Clusters of Hydrated $C_{60}@ \{H_2O\}_n$ Fullerene Complexes	285
Y. T. Krivoruchko and Y. G. Shatrakov	
Microwave Radio Beacon Instrument Approach Landing System for the Highly-Maneuverable Aircrafts on Principles of the Cognitive Processing	294

History of science and technology

L. I. Zolotinkina	
At the Origins of Domestic Radio Electronics	308
V. M. Pestrikov	
Success Business Plan for AT&T	327
Ye. V. Kondratova, Ye. I. Sviridova, and P. P. Yermolov	
IEEE oral history project: Academician Yu. V. Gulyaev. Part 5	356

Infocommunications and Radio Technologies, vol. 6, no. 3, pp. 275–284, 2023.

Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2023. Т. 6, № 3. С. 275—284.

ISSN: 2587-9936

DOI: 10.29039/2587-9936.2023.06.3.21

УДК 621.382.323

Полевой транзистор с металлическим затвором

Обухов И. А.

Научно-производственное предприятие «Радиотехника»

г. Москва, 115419, 5-й Донской проезд, д. 15, стр. 11, Российская Федерация

iao001@mail.ru, ia@npprt.ru

Получено: 27 мая 2023 г.

Отрецензировано: 31 мая 2023 г.

Принято к публикации: 31 мая 2023 г.

Аннотация: Представлена конструкция и описан принцип функционирования полевого транзистора на основе полупроводникового нанопровода с затвором из металла. Оценена подпороговая крутизна прибора и показано, что она может превышать термоэмиссионный предел (значение $e/k_B T$).

Ключевые слова: полевой транзистор, нанопровод, размерное квантование, металлический затвор.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Обухов И. А. Полевой транзистор с металлическим затвором // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2023. Т. 6, № 3. С. 275—284.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Обухов, И. А. Полевой транзистор с металлическим затвором / И. А. Обухов // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2023. — Т. 6, № 3. — С. 275—284.

1. Введение

Последние двадцать лет разработчики компонентной базы цифровой электроники активно предлагают и исследуют разнообразные модификации полевых транзисторов, такие как *FinFET*, *GAA FET*, *MBCFET*, *Nanosheet FET*, *NCTFET* и т. д. [1]. Целью этих работ является повышение быстродействия приборов типа металл — окисел — полупроводник (МОП) или металл — диэлектрик — полупроводник (МДП) путем увеличения их крутизны. Судя по наблюдающейся уже более десяти лет стагнации скоростных характеристик кремниевых цифровых схем, прорывных результатов на этом пути пока получить не удалось.

Суть проблемы достаточно проста [2]. Для повышения производительности процессора необходимо увеличение количества транзисторов.

При этом необходимо не увеличить, а по возможности уменьшить, массу и габариты микросхемы. Поэтому транзистор должен быть как можно меньше. Уменьшение площади сечения канала полевого транзистора приводит при фиксированной плотности тока к снижению полного тока через него, то есть к уменьшению крутизны. Повышение плотности тока без увеличения подвижности носителей заряда, а подвижность при уменьшении размеров не увеличивается, ведет к увеличению тепловыделения и еще большему снижению крутизны за счет уменьшения подвижности с ростом температуры.

Повысить крутизну можно путем увеличения ширины затвора. Именно эта идея лежит в основе большинства современных модификаций полевых транзисторов. Но ширина затвора ограничена периметром поперечного сечения канала транзистора.

Также повысить крутизну полевых транзисторов можно, уменьшая длину канала и/или увеличивая емкость МОП или МДП конденсатора. Но и эти способы наталкиваются на серьезные ограничения.

В данной работе предлагается специальная конструкция полевого транзистора, которая для повышения его крутизны позволяет использовать явление размерного квантования энергии электронов в металле.

2. Конструкция и принцип функционирования транзистора

На рис. 1 и 2 показана конструкция предлагаемого полевого транзистора с металлическим затвором (ПТМЗ). Он представляет собой нанопровод (канал) с двумя омическими контактами (исток и сток) и вставкой из металла посередине (область затвора), а также два контакта к затвору, отделенных от него диэлектриком. Для оценок выбирались конкретные материалы элементов прибора, показанные на рисунках.

Нанопровод должен быть достаточно тонким и за счет размерного квантования обеспечивать малую концентрацию собственных электронов в канале и высокий потенциальный барьер Шоттки (порядка 1 эВ со стороны металла) на границах с областью затвора при нулевых V_g и V_{ds} .

Область затвора должна быть выполнена из металла с низкой концентрацией электронов проводимости, позволяющей эффективно управлять их концентрацией посредством изменения напряжения V_g .

Диэлектрик, отделяющий контакты затвора от области затвора, должен обеспечивать наличие достаточно высокого и широкого (ширина d_i) потенциального барьера, предотвращающего утечки.

При приложении к контактам затвора отрицательного напряжения V_g у его краев появляются области пространственного заряда (ОПЗ) шири-

ной W , а электроны перемещаются к центру затвора. Суммарное количество электронов не изменяется, а их концентрация в центральной области затвора увеличивается за счет уменьшения занимаемого объема. Увеличение концентрации электронов в затворе приводит к повышению энергии Ферми в нем и уменьшению высоты потенциального барьера ΔE для электронов между каналом и затвором. В результате, плотность тока J термоэлектронной эмиссии при ненулевых значениях напряжения V_{ds} оказывается функцией от V_g .

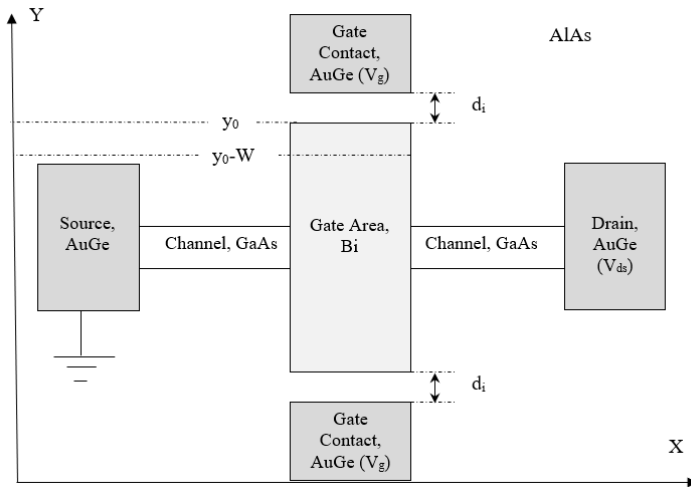


Рис. 1. Конструкция полевого транзистора с металлическим затвором.

Fig. 1. The design of the field-effect transistor with a metal gate

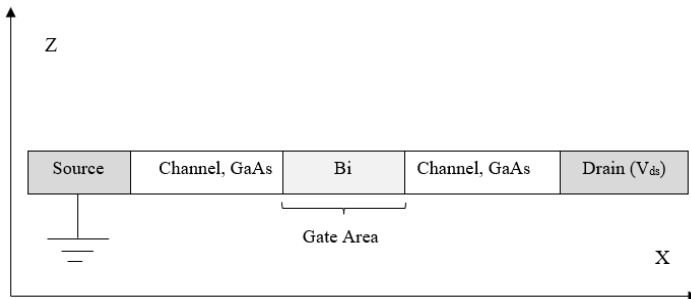


Рис. 2. Сечение прибора в плоскости XOZ.

Fig. 2. Cross section of the device in the XOZ plane

Справедлива простая оценка

$$\partial \ln J / \partial V_g = -V^{-1} \partial V / \partial V_g - (k_B T)^{-1} (\partial \Delta E / \partial V_g), \quad (1)$$

где: V — объем области затвора; k_B — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура.

Считая, что область затвора представляет собой параллелепипед с длинами сторон L_{gx} , L_{gz} и L по направлениям OX , OZ и OY соответственно, можно получить приближенные выражения

$$V^{-1} \partial V / \partial V_g = -(2/(L - 2W)) \partial W / \partial V_g, \quad (2)$$

$$(\partial \Delta E / \partial V_g) = -(h/m_g)(\pi/3(n + n_1))^{1/3} (2m_g E_{gmin})^{1/2} (L - 2W)^{-3} \partial W / \partial V_g. \quad (3)$$

Здесь: h — постоянная Планка; m_g — эффективная масса электронов проводимости в затворе;

$$n = n_0 [L/(L - 2W)]; \quad (3)$$

n_0 — концентрация электронов в объемном материале затвора;

$$n_1 = (8\pi/3h^3)(2m_g E_{gmin})^{3/2}; \quad (4)$$

$$E_{gmin} = (h^2/8m_g)[1/L_{gx}^2 + 1/L_{gz}^2 + 1/(L - 2W)^2] \quad (5)$$

— минимальная энергия электронов в области затвора.

Из соотношений (1) — (5) следует формула

$$\partial \ln J / \partial V_g = (1/(L - 2W)) [2 + (k_B T)^{-1} (h/m_g) (\pi/3(n + n_1))^{1/3} (2m_g E_{gmin})^{1/2} (L - 2W)^{-2}] (\partial W / \partial V_g). \quad (6)$$

В этом выражении первое слагаемое в квадратной скобке соответствует чисто классическому изменению объема области затвора, занятой электронами, при изменении W . Второе слагаемое появляется из-за изменения в этой области минимальной допустимой энергии электронов и обусловлено ее размерным квантованием.

Используя одномерное уравнение Пуассона, нетрудно получить

$$\partial W / \partial V_g = (\varepsilon_i / d_i e n_0) [1 + (2\varepsilon_i^2 / \varepsilon e n_0 d_i^2) (\varphi - V_g)]^{-1/2}, \quad (7)$$

где: ε_i — диэлектрическая проницаемость диэлектрика; e — элементарный заряд; ε — диэлектрическая проницаемость материала затвора;

$$\varphi = -F/e + (3h^3(n + n_1)/8\pi)^{2/3} / 2m_g e \quad (8)$$

— электростатический, а F — химический потенциалы электронов в затворе.

Для того, чтобы подпороговая крутизна транзистора превысила термозмиссионный предел, необходимо выполнение неравенства

$$\xi = (\partial \ln J / \partial V_g)(k_B T / e) =$$

$$= [\varepsilon_i / d_i e n_0 (L - 2W)(1 + (2\varepsilon_i^2 / \varepsilon e n_0 d_i^2)(\varphi - V_g))^{\frac{1}{2}}] \{2k_B T / e +$$

$$+ (h / m_g e)(\pi / 3(n + n_1))^{\frac{1}{3}}(2m_g E_{gmin})^{\frac{1}{2}}(L - 2W)^{-2}\} > 1. \quad (9)$$

Отметим, что второе, пропорциональное постоянной Планка слагаемое в фигурной скобке выражения (9), не зависит от температуры.

3. Результаты расчетов

Полученные аналитические выражения являются приближенными. Для более точного моделирования функционирования предлагаемого транзистора необходимо самосогласованное решение уравнений Шредингера, Пуассона и переноса в трехмерном стационарном случае. Оно может быть проведено, например, в рамках модели, описанной в работе [3]. Но и представленных здесь формул достаточно для предварительной оценки характеристик ПТМЗ.

Расчеты проводились в предположении, что $T = 300^\circ K$ и $L_{gx} = L_{gz} = 25$ нм, $L = 44$ нм.

На рис. 3 и 4 показаны зависимости ширины области обеднения W и концентрации n электронов проводимости в центре области затвора от напряжения на затворе V_g . При значениях $V_g < -0,925$ В наблюдается резкое возрастание W и концентрации. Отметим, что аналогичный резкий рост концентрации электронов в тонких пленках висмута при уменьшении их толщины наблюдался экспериментально [4].

На рис. 5 представлена зависимость параметра ξ от V_g на начальном участке возрастания, который коррелирует с областью резкого роста концентрации электронов проводимости в центральной области затвора.

На рис. 6 показаны классический и квантовый вклады в величину $\partial \ln J / \partial V_g$ в диапазоне напряжений на затворе от 0 В до $-0,875$ В. Видно, что при $V_g < -0,75$ В квантовый вклад в подпороговую крутизну транзистора начинает превышать классический, и дальнейший быстрый рост параметра ξ при убывании V_g связан именно с квантовым вкладом.

Поведение параметра ξ при всех значениях напряжений на затворе, при которых производились расчеты, представлено на рис. 7. Видно, что подпороговая крутизна рассматриваемого полевого транзистора при $V_g < -0,93$ В может в десятки раз превышать термозмиссионный предел (значение $\xi = 1$).

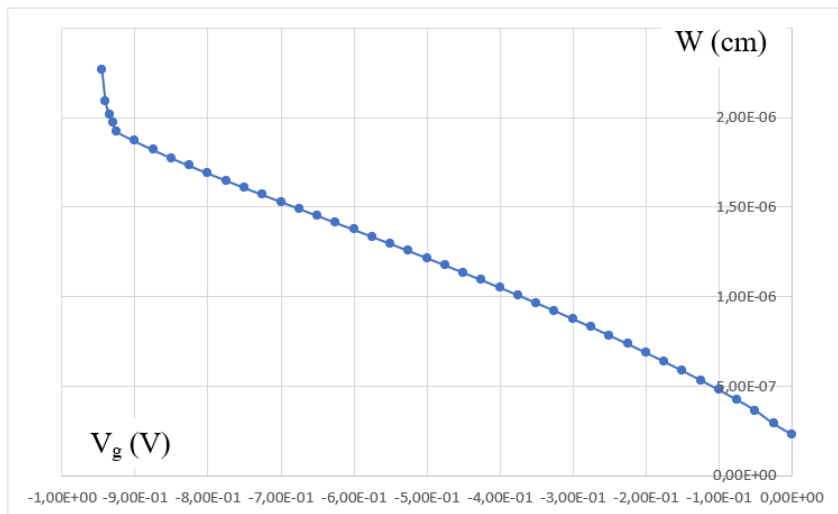


Рис. 3. Зависимость ширины области обеднения в затворе от напряжения на затворе.

Fig. 3. Dependence of the width of the depletion region in the gate on the gate voltage

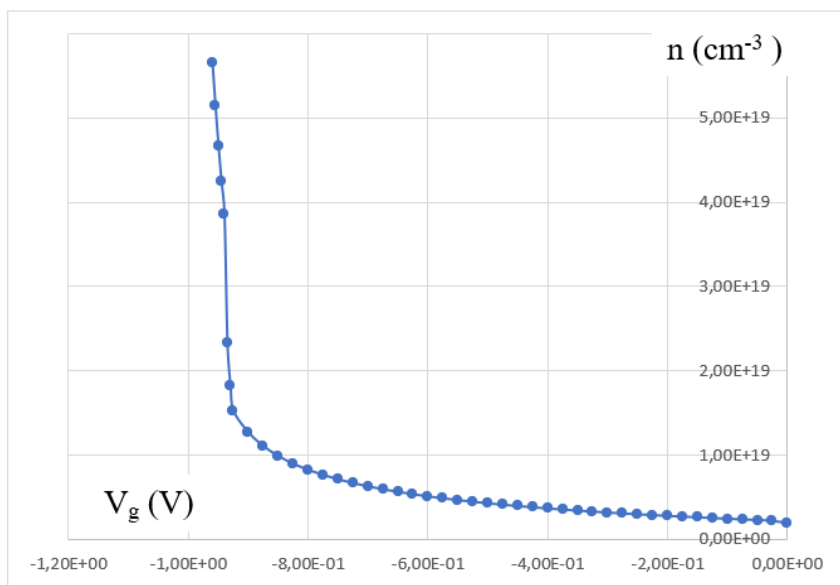


Рис. 4. Зависимость концентрации электронов проводимости в центре затвора от напряжения на затворе.

Fig. 4. Dependence of the concentration of conduction electrons at the center of the gate on the gate voltage

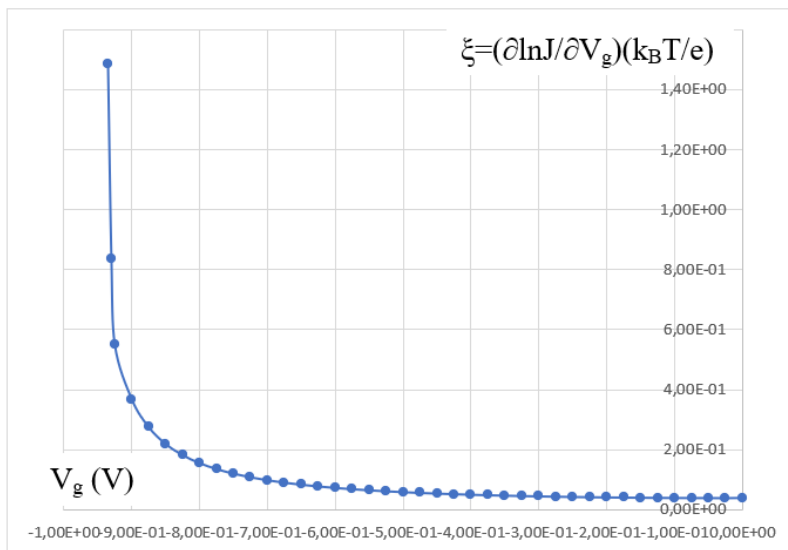


Рис. 5. Зависимость параметра ξ от напряжения на затворе на начальном участке возрастания.

Rice. Fig. 5. Dependence of the parameter ξ on the gate voltage in the initial section of the increase

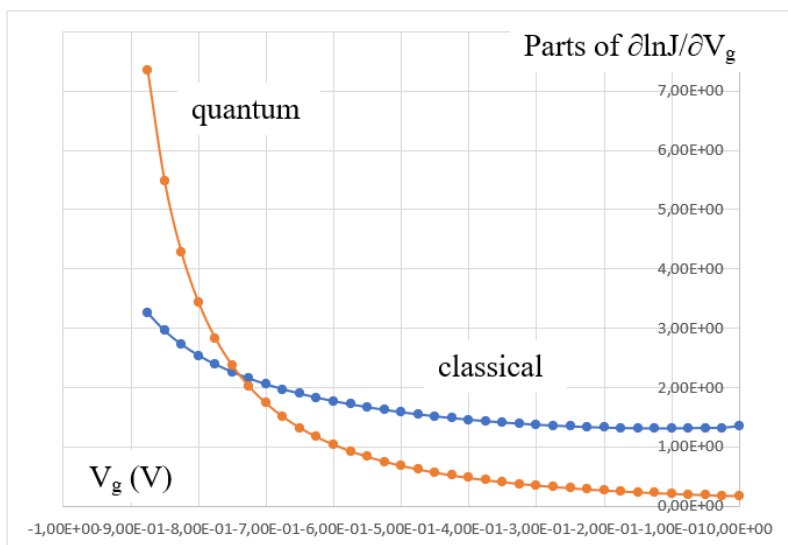
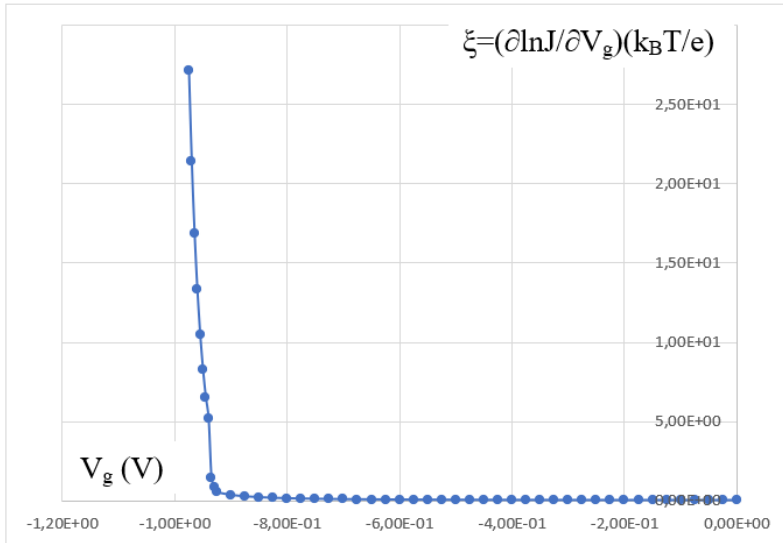


Рис. 6. Классический и квантовый вклады в подпороговую крутизну транзистора.

Fig. 6. Classical and quantum contributions to the subthreshold transconductance of a transistor

Рис. 7. Зависимость параметра ξ от напряжения на затворе.Fig. 7. Dependence of the parameter ξ on the gate voltage

4. Заключение

В настоящей работе предложена конструкция полевого транзистора с каналом из нанопровода и областью затвора из металла. Для создания необходимого потенциального рельефа для электронов в канале и в затворе транзистора необходимо, чтобы размеры элементов прибора были меньше, чем длина размерного квантования электронов при температуре функционирования.

При нулевых напряжениях на контактах затвора транзистор заперт. Плотность тока в нем определяется концентрацией собственных носителей заряда в нанопровode (в канале), которая может быть сделана малой за счет уменьшения его поперечного сечения и соответствующего эффективного расширения запрещенной зоны. При приложении к контактам затвора отрицательного напряжения концентрация электронов в затворе в области канала увеличивается, а потенциальный барьер на границе затвор-канал понижается. В результате за счет инжектируемых из затвора электронов возрастает плотность тока в канале.

Подпороговая крутизна такого транзистора может существенно превышать термоэмиссионный предел. Этот результат является следствием размерного квантования энергии электронов в области затвора.

Список литературы

1. Красников Г. Я. Возможности микроэлектронных технологий с топологическими размерами менее 5 нм // Наноиндустрия. 2020. Т. 1, № S5-1 (102). С. 13—19.
2. Обухов И. А. Моделирование переноса заряда в мезоскопических структурах. Москва — Киев — Минск — Севастополь : «Вебер», 2005. 226 с.
3. Обухов И. А. Многокомпонентная модель переноса заряда в квантовых полупроводниковых приборах // Нано- и микросистемная техника. 2021. Том 23, № 1. С. 24—31.
4. Особенности проявления квантового размерного эффекта в явлениях переноса в тонких пленках висмута на подложках из слюды / Е. В. Демидов и др. // Физика и техника полупроводников. 2019. Том 53, вып. 6. С. 736—740.

Информация об авторе

Обухов Илья Андреевич, технический директор АО «НПП «Радиотехника», г. Москва, Российская Федерация.

Field Effect Transistor with Metal Gate

I. A. Obukhov

Scientific-Industrial Company “Radiotekhnika”
15, build. 11, 5th Donskoy proezd, Moscow, 115419, Russian Federation
iao001@mail.ru, ia@npprt.ru

Received: May 27, 2023

Peer-reviewed: May 31, 2023

Accepted: May 31, 2023

Abstract: The design and the principle of operation of a field effect transistor based on a semiconductor nanowire with a metal gate is presented and described. The subthreshold slope of the device has been estimated and was shown that it may to exceed the thermionic limit (value $e/k_B T$).

Keywords: field effect transistor, nanowire, dimensional quantization, metal gate.

For citation (IEEE): I. A. Obukhov, “Field Effect Transistor with Metal Gate,” *Info-communications and Radio Technologies*, vol. 6, no. 3, pp. 275–284, 2023, doi: 10.29039/2587-9936.2023.06.3.21. (In Russ.).

References

- [1] G. Ya. Krasnikov, “The Capabilities of Microelectronic Processes with 5 nm Critical Dimension and Less,” *Nanoindustry*, vol. 1, no S5-1 (102), pp. 13–19, 2020 (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2020.13.5s.13.19>.
- [2] I. A. Obukhov, *Modeling of Charge Transfer in Mesoscopic Structures*, Moscow–Kyiv–Minsk–Sevastopol : Weber Publ. Co., 2005. (In Russ.).
- [3] I. A. Obukhov, “Multicomponent Model of Charge Transport in Quantum Semiconductor Devices,” *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, vol. 23, no. 1, pp. 24–31, 2021, doi: 10.17587/nmst.23.24-31.
- [4] E. V. Demidov et al., “The Quantum Size Effect Specific Features of in the Transport Phenomena in Thin Bismuth Films on Mica Substrates,” *Fizika i tekhnika poluprovodnikov*, vol. 53, no 6. pp. 736–740, 2019. (In Russ.). DOI: 10.21883/FTP.2019.06.47718.27.

Information about the author

Ilya A. Obukhov, Technical Director of JSC NPP Radiotekhnika, Moscow, Russian Federation.

УДК 548.737

Исследование внутренней структуры кластеров $[C_{60}@H_2O]_k$ гидратированных комплексов фуллерена $C_{60}@H_2O$ методами АСМ

Торхов А. Н.

Севастопольский государственный университет
ул. Университетская, д. 33, Севастополь, 299053, Российская Федерация
trkf@mail.ru; natorkhov@sevsu.ru

Получено: 23 мая 2023 г.

Отрецензировано: 31 мая 2023 г.

Принято к публикации: 31 мая 2023 г.

Аннотация: С использованием методов АСМ подтверждено наличие у кластеров $[C_{60}@H_2O]_k$, окруженного рыхлой оболочкой более твердого центрального ядра, и проведены оценки силы сцепления ядра с рыхлой оболочкой.

Ключевые слова: водные коллоидные растворы фуллерена C_{60} , структура кластеров $[C_{60}@H_2O]_k$, методы АСМ, микромеханические свойства.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Торхов А. Н. Исследование внутренней структуры кластеров $[C_{60}@H_2O]_k$ гидратированных комплексов фуллерена $C_{60}@H_2O$ методами АСМ // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2023. Т. 6, № 3. С. 285—293.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Торхов, А. Н. Исследование внутренней структуры кластеров $[C_{60}@H_2O]_k$ гидратированных комплексов фуллерена $C_{60}@H_2O$ методами АСМ / А. Н. Торхов // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2023. — Т. 6, № 3. — С. 285—293.

1. Введение

Большинство применений бакибола фуллерена C_{60} в электронных [1, 2], органических [3], химических [4] и биологических [5] нанотехнологиях, медицине [6] связано с использованием коллоидных систем. В частности, его водные коллоидные растворы являются промежуточным звеном в использовании их уникальных свойств в различных технологических приложениях.

Как правило молекулы C_{60} практически не растворимы в воде. Тем не менее, непрямыми способами из них получают достаточно стабильные вод-

ные коллоидные растворы плотностью 10^{-4} — $1,0 \text{ mg/ml}$ [5, 7]. В процессе протекания такой реакции гидратирования происходит структурирование (коагуляция) объемной воды вокруг бакибола C_{60} с формированием прочной двухмерной 2D-сетки первого слоя диаметром $1,6$ — $1,8 \text{ nm}$, состоящего из $n = 20$ молекул воды и образованием гидратированного супер молекулярного комплекса фуллерена $C_{60}@ \{H_2O\}_{n=20}$ ($C_{60}FAS$ — *Fullerene Aqueous Colloid Solution* [7]). Согласно [8] окружающие бакибол молекулы воды формируют додекаэдр — квази-сферическую структуру из 20 молекул H_2O , каждая из которых располагается прямо над центром каждого из 20 шестиугольных колец фуллерена и образует с этим кольцом водородную π -связь. Согласно [7] водная 2D-сетка остается стабильной до температур 100°C , а ее температура плавления при нормальных условиях $T_{\text{пл}} = 2,80^\circ\text{C}$ заметно отличаются от $T_{\text{пл}} = 0^\circ\text{C}$ обычной воды. Впоследствии на основе расчетов с использованием первопринципных методов было показано, что наиболее энергетически стабильной является комплекс фуллерена C_{60} с гидратной оболочкой, состоящей из шестидесяти $n = 60$ молекул воды $C_{60}(H_2O)_{60}$ [9].

В зависимости от концентрации гидрофильные комплексы $C_{60}@ \{H_2O\}_n$ в коллоидных растворах, в свою очередь, могут ассоциировать друг с другом за счет их водных оболочек с образованием целого набора сферических кластеров $[C_{60}@ \{H_2O\}_n]_k$ (k — целое число) размерами от единиц ($3,4; 7,1; 10,9; 14,5; 18,1; 21,8; 25,4; 28,8; 32,4; 36,0 \text{ nm}$ [10]) до сотен (380 — 800 нанометров [11]).

Важность исследования дисперсного состава данных коллоидных систем определяется еще и тем, что размеры кластеров оказывают значительное влияние на их оптические (цвет, интенсивность люминесценции), химические, механические и электрофизические свойства и, как следствие, на свойства коллоидного раствора.

Практически все из этих свойств напрямую связаны со внутренним строением таких кластеров. В частности, авторы [12] в 2002 году описали модель сферического (икосаэдрического) кластера $[C_{60}@ \{H_2O\}_n]_{13}$ диаметром $3,4 \text{ nm}$, состоящего из тринадцати $k = 13$ бакиболов C_{60} , окруженных общей структурированной водной оболочкой. Позже (2020 г.) авторы [13] показали, что устойчивый кластер из фуллеренов в коллоидном растворе должен иметь плотную упаковку молекул C_{60} внутри — плотное ядро и рыхлую внешнюю оболочку.

Несмотря на большой объем накопленной информации о самих фуллеренах и их гидратированных комплексах, механизмы формирования супермолекулярных кластеров $[C_{60}@ \{H_2O\}_n]_k$ в водных коллоидных растворах, которые в конечном итоге и определяют свойства коллоидного

раствора, все еще остаются малоизученными. Причиной этому является недостаток экспериментальных данных о внутреннем строении таких кластеров, связанный с их повышенной чувствительностью к различного рода внешним воздействиям (например, высокой мощности луча электронного микроскопа) и низкой разрешающей способностью на наноуровне некоторых используемых аналитических методов (например, *DLS*).

Исходя из вышеизложенного, задачей данной работы является исследование высокоразрешающими методами АСМ внутреннего строения кластеров $[C_{60}@{H_2O}]_n$.

2. Методика эксперимента

Для приготовления водного раствора фуллерена C_{60} использовали его насыщенный раствор в толуоле (чистотой $>99,99\%$ по анализу *HPLC* (*High-performance liquid chromatography*) с концентрацией молекул C_{60} , соответствующей максимальной растворимости $\sim 2,9$ мг/мл (раствор $C_{60}:C_7H_8$). Затем, насыщенный раствор $C_{60}:C_7H_8$ смешивали в открытой колбе с одинаковым количеством дистиллированной воды и в таком виде обрабатывали в ультразвуковой ванне при комнатной температуре. Процедуру продолжали до полного испарения толуола и окрашивания жидкой фазы в светло-коричневый цвет. В результате такой процедуры из раствора полностью удалялся органический растворитель и образовывался слабо опалесцирующий полупрозрачный водный коллоидный раствор гидратированных кластеров $[C_{60}@{H_2O}]_n$ и их агрегатов [14, 15] с примесью флоккул — взвешенных в объеме хлопьевидных скоплений. Очистка от флоккул осуществлялась путем центрифугирования при 10000 об/мин в течение 5 минут.

Для приготовления образцов из объема аликвоты прецизионным дозатором отбирали надосадочную жидкость и раскапывали на поверхность эпитаксиального кремния дырочного типа проводимости (p -Si{111}). После высыхания капли аликвоты водно-коллоидные кластеры $[C_{60}@{H_2O}]_n$ размерами от единиц до сотен нанометров оказываются броуновским образом рассосредоточены по поверхности эпитаксиального слоя.

Исследование формы кластеров $[C_{60}@{H_2O}]_n$, их фазового состава и внутреннего строения осуществлялось на воздухе при нормальных условиях с использованием атомно-силового микроскопа (АСМ) *NTEGRA-SPECTRA* производства «НТ-МДТ» на базе Центра коллективного пользования «Молекулярная структура вещества» Севастопольского государ-

ственного университета. Высокая точность (по горизонтали $\sim 0.2 \text{ nm}$, а по вертикали $\sim 0.04 \text{ nm}$) и чувствительность метода АСМ в широком интервале измерительных масштабов, а также возможность прецизионного управления силой F_{ts} воздействия зонда на исследуемый нанообъект на микронном и нано-уровнях делает этот метод предпочтительным в данном случае перед всеми остальными методами.

3. Результаты экспериментов

Согласно общим физическим представлениям, взаимодействие зонда с поверхностью должно определяться не только молекулярными силами взаимодействия зонда с поверхностью, но и микромеханическими свойствами поверхности и приповерхностной области. Например, из теории нелинейных колебаний хорошо известно, что наличие связи между линейным (балка кантилевера) и нелинейным (кластер) колебательными контурами может приводить не только к изменению амплитуды колебаний, но и к изменению фазы $\Delta\theta$. Сложное конструктивное строение гидратированных кластеров, судя по всему, обуславливает наличие у них нелинейных микромеханических свойств, что позволяет рассматривать такие наночастицы в качестве нелинейных механических колебательных систем. На рис. 1 различия в нелинейности микромеханических свойств разных участков кластера (ядра и «шубы») схематично обозначены виде различных пружин с разным шагом и диаметром витков. В результате, на том участке поверхности гидратной оболочки — области G , под которой расположено ядро, взаимодействие зонд — поверхность будет отличаться от аналогичного взаимодействия вне этой области (рис. 1, области Q). В этом случае, даже если фазовый состав поверхности шубы будет однородный, обусловленные ядром локальные неоднородности механических свойств приповерхностной области на участке G (рис. 1) будут приводить к изменению фазы $\Delta\theta$ и возникновению фазового контраста $\Delta\theta = \Delta\theta(x; y)$, что мы и наблюдаем в экспериментах.

Увеличение или уменьшение силы прижатия кантилевера F_{ts} подтвердило наличие у кластеров неоднородных механических свойств и ярко выраженной внутренней структуры. Например, при $F_{\text{ts}} < 36 \text{ nN}$ кластеры проявляют простую дискообразную форму. Увеличение силы прижатия $F_{\text{ts}} \geq 36 \text{ nN}$ позволяет выявлять на поверхности кластера участки с неоднородными микромеханическими свойствами, что позволяет «пальпировать» их внутреннее строение и выявить под поверхностью наличие более жесткой центральной области — ядра. Тут стоит отметить, что необходимое для реализации тех или иных целей значение F_{ts} может варьироваться в зависимости от размеров кластера и режимов измерения (например, резонансной частоты f , амплитуды A_{max} и упругости балки кантилевера).

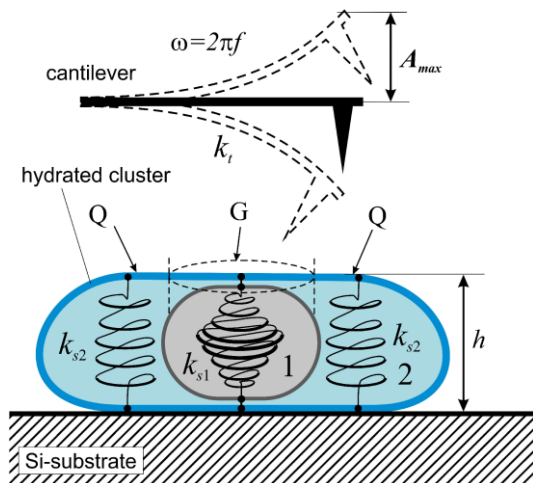


Рис. 1. Схема полуконтактного режима АСМ-сканирования кластера $[C_{60}@ \{H_2O\}_{20}]_k$: 1 — плотное ядро кластера, 2 — рыхлая оболочка, k_t — коэффициент упругости балки кантилевера, k_{s1} — коэффициент упругости ядра, k_{s2} — коэффициент упругости рыхлой оболочки.

Fig. 1. Scheme of the semi-contact mode of AFM scanning of the $[C_{60}@ \{H_2O\}_{20}]_k$ cluster: 1 is the dense core of the cluster, 2 is the loose shell, k_t is the elasticity coefficient of the cantilever beam, k_{s1} is the elasticity coefficient of the core, k_{s2} is the elasticity coefficient of the loose shell

При более сильном воздействии $F_{ts} \geq 42$ nN шуба легко «сдвигается» и оголяет более жесткое ядро. Данный эффект продемонстрирован на примере относительно небольшого кластера с поперечными размерами $d \sim 70$ nm. На растровом АСМ-изображении видно, что выступающее из гидратной оболочки («шубы») ядро размером d_c окружено ее остатками (рис. 2a). Это хорошо продемонстрировано и на профиле поперечного сечения $h=h(x;y)$ (рис. 2a, А-А). Растровое изображение фазового контраста указывает на различия в фазовом составе водной шубы и ядра, а профиль поперечного сечения $\Delta\theta=\Delta\theta(y)$ позволяет точно определить границы их фаз (рис. 2b, В-В).

4. Заключение

Таким образом, возникновение фазового контраста на однородной по составу поверхности при ее АСМ-сканировании в полуконтактном режиме может указывать на различие микромеханических свойств центральной и периферийной областей кластеров $[C_{60}@ \{H_2O\}_n]_k$. Прямыми АСМ-измерениями подтверждены выводы работы [12] о наличии у кластеров,

окруженных рыхлой оболочкой, более твердого центрального ядра, и проведены оценки силы сцепления ядра с рыхлой оболочкой.

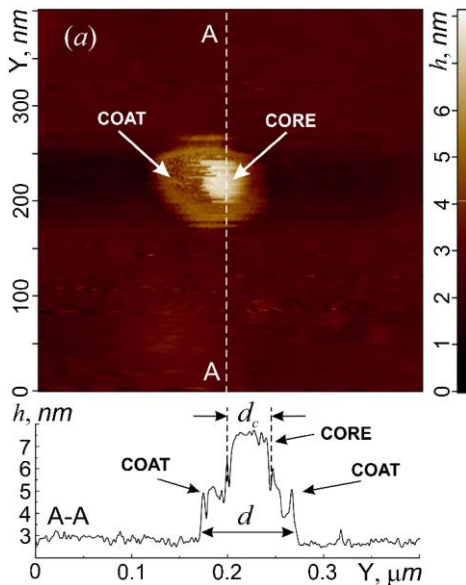


Рис. 2а. Растровое 300×300 точек АСМ изображение рельефа $h = h(x; y)$ 0.4×0.4 μm участка поверхности образца ($A_{\text{max}} = 30 \text{ nm}$ и $F_{\text{is}} = 4 \text{ nN}$) с профилем $h = h(y)$ сечения А-А.

Fig. 2a. Raster 300×300 points AFM relief image $h = h(x; y)$ 0.4×0.4 μm of sample surface area ($A_{\text{max}} = 30 \text{ nm}$ and $F_{\text{is}} = 4 \text{ nN}$) with profile $h = h(y)$ of section A-A

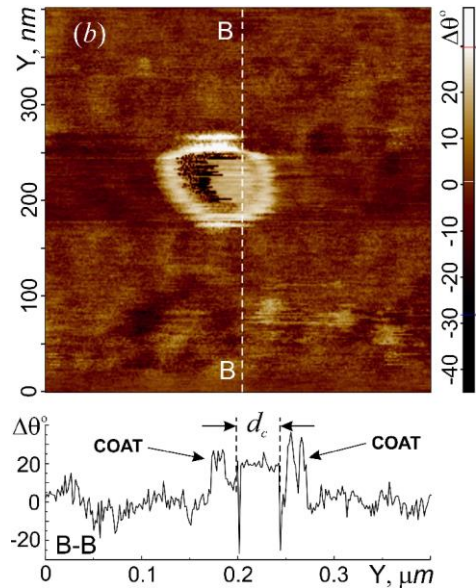


Рис. 2б. Растровое 300×300 точек АСМ изображение фазового контраста $\Delta\theta = \Delta\theta(x; y)$ 0.4×0.4 μm участка поверхности с профилем $\Delta\theta = \Delta\theta(y)$ сечения В-В.

Fig. 2b. Raster 300×300 points AFM image of the phase contrast $\Delta\theta = \Delta\theta(x; y)$ 0.4×0.4 μm of a surface section with a profile $\Delta\theta = \Delta\theta(y)$ of section B-B

Благодарности

Автор выражает благодарность научному сотруднику НИЛ «Молекулярная и клеточная биофизика» Мосунову Андрею Александровичу за помощь в приготовлении образцов.

Список литературы

1. Kronholm D. F. et al. Blends of fullerene derivatives, and uses thereof in electronic devices. Patent №: US 8,945,807 B2, date of Patent: Feb. 3, 2015.
2. Bakhramov S. A.; Kokhkharov A. M.; Makhmanov U. K.; Aslonov B. A. Self-Organization of Fullerene C60/70 Molecules in Solutions and in the Volume of Drying Drop // Scientific-technical journal. 2020. Vol. 24, iss. 5. Article 6.
3. Harris P. J. F. Fullerene Polymers : A Brief Review // Journal of Carbon Research. 2020. T. 6, № 4. C. 71.
4. Evstigneev M. P. et al. Complexation of C60 fullerene with aromatic drugs // Chem-PhysChem. 2013. T. 14, № 3. C. 568—578.

5. Prylutska S. et al. Water-Soluble Pristine Fullerenes C₆₀ Increase the Specific Conductivity and Capacity of Lipid Model Membrane and form the Channels in Cellular Plasma Membrane // J. Biomed. Nanotechnol. 2012. T. 8, № 3. C. 522—527.
6. Kumar A. Fullerenes for biomedical applications // Journal of Environmental and Applied Bioresearch. 2015. T. 3, № 4. C. 175—191.
7. Ritter U. et al. Structural Features of Highly Stable Reproducible C₆₀ Fullerene Aqueous Colloid Solution Probed by Various Techniques // Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures. 2015. T. 23, № 6. C. 530—534.
8. Chaplin M. Water structure and behavior. London : South Bank University, 2003. Available: <http://www.lsbu.ac.uk/water/buckmin.Html> (accessed June 2000).
9. Scharff P. et al. Structure of C60 fullerene in water: spectroscopic data // Carbon. 2004. T. 42, № 5-6. C. 1203—1206.
10. Andrievsky G. V. et al. Studies of aqueous colloidal solutions of fullerene C60 by electron microscopy // Chemical Physics Letters. 1999. T. 300, № 3-4. C. 392—396.
11. Makhmanov U. K. et al. The formation of self-assembled structures of C60 in solution and in the volume of an evaporating drop of a colloidal solution // Lithuanian Journal of Physics. 2020. T. 60, № 3. C. 194—204.
12. Andrievsky G. V. et al. Comparative analysis of two aqueous-colloidal solutions of C60 fullerene with help of FTIR reflectance and UV–Vis spectroscopy // Chemical Physics Letters. 2002. T. 364, № 1-2. C. 8—17.
13. Peidys D. A., Santiago A. A. H., Evstigneev M. P. The interplay of enthalpic/entropic factors in nanoparticles' aggregation in solution : The case of fullerene C60 // Journal of Molecular Liquids. 2020. T. 318. C. 114043.
14. Ritter U. et al. Structural features of highly stable reproducible C60 fullerene aqueous colloid solution probed by various techniques // Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures. 2015. T. 23, № 6. C. 530—534.
15. Prylutsky Y. I. et al. C 60 fullerene aggregation in aqueous solution // Physical Chemistry Chemical Physics. 2013. T. 15, № 23. C. 9351—9360.

Информация об авторе

Торхов Николай Анатольевич, ведущий научный сотрудник НИЛ «Динамика полета и управление беспилотными авиационными комплексами» Института национальной технологической инициативы Севастопольского государственного университета, Севастополь, Российская Федерация. ORCID: 0000-0001-8902-6319.

AFM Study of the Internal Structure of $[C_{60}@H_2O]_n$ Clusters of Hydrated $C_{60}@H_2O$ Fullerene Complexes

N. A. Torkhov

Sevastopol State University

33, Universitetskaya Str., Sevastopol, 99053, Russian Federation
trkf@mail.ru, natorkhov@sevsu.ru

Received: May 23, 2023

Peer-reviewed: May 31, 2023

Accepted: May 31, 2023

Abstract: AFM methods were used to confirm the presence of a harder central core surrounded by a loose shell in $[C_{60}@H_2O]_n$ clusters and to estimate the adhesion force between the core and the loose shell.

Keywords: aqueous colloidal solutions of C_{60} fullerene, $[C_{60}@H_2O]_n$ cluster structure, AFM methods, micromechanical properties.

For citation (IEEE): N. A. Torkhov, "AFM Study of the Internal Structure of $[C_{60}@H_2O]_n$ Clusters of Hydrated $C_{60}@H_2O$ Fullerene Complexes," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 6, no. 3, pp. 285–293, 2023, doi: 10.29039/2587-9936.2023.06.3.22. (In Russ.).

References

- [1] D. F. Kronholm et al., Blends of fullerene derivatives, and uses thereof in electronic devices. Patent №: US 8,945,807 B2, date of Patent : Feb. 3, 2015.
- [2] S. A. Bakhramov, A. M. Kokhkharov, U. K. Makhmanov, and B. A. Aslonov, "Self-Organization of Fullerene C60/70 Molecules in Solutions and in the Volume of Drying Drop," *Scientific-technical journal*, vol. 24, iss. 5, Article 6, 2020.
- [3] P. J. F. Harris, "Fullerene Polymers : A Brief Review," *Journal of Carbon Research*, vol. 6, no. 4, p. 71, Nov. 2020, doi: 10.3390/c6040071.
- [4] M. P. Evstigneev, A. S. Buchelnikov, D. P. Voronin, Y. V. Rubin, L. F. Belous, Y. I. Prylutskiy, U. Ritter, "Complexation of C60 fullerene with aromatic drugs," *ChemPhysChem*, vol 14, no. 3, pp. 568–578, 2013.
- [5] S. Prylutska et al., "Water-Soluble Pristine Fullerenes C60 Increase the Specific Conductivity and Capacity of Lipid Model Membrane and form the Channels in Cellular Plasma Membrane," *J. Biomed. Nanotechnol.*, vol. 8, no. 3, pp. 522–527, Jun. 2012, doi: 10.1166/jbn.2012.1404.
- [6] A. Kumar, "Fullerenes for biomedical applications," *Journal of Environmental and Applied Bioresearch*, vol. 3, no. 4, pp. 175–191.
- [7] U. Ritter et al., "Structural Features of Highly Stable Reproducible C60Fullerene Aqueous Colloid Solution Probed by Various Techniques," *Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures*, vol. 23, no. 6, pp. 530–534, Jun. 2015, doi: 10.1080/1536383x.2013.870900.
- [8] M. Chaplin, *Water structure and behavior*, London : South Bank University, June 2000.

- [9] P. Scharff et al., “Structure of C60 fullerene in water: spectroscopic data,” *Carbon*, vol. 42, no. 5–6, pp. 1203–1206, Jan. 2004, doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2003.12.053>.
- [10] G. V. Andrievsky, V. K. Klochkov, E. L. Karyakina, and N. O. Mchedlov-Petrosyan, “Studies of aqueous colloidal solutions of fullerene C60 by electron microscopy,” *Chemical Physics Letters*, vol. 300, iss. 3–4, pp. 392–396, 1999, doi: [10.1016/S0009-2614\(98\)01393-1](https://doi.org/10.1016/S0009-2614(98)01393-1).
- [11] U. K. Makhmanov, Abdulmutallib Kokhkharov, S. A. Bakhramov, and Donats Erts, “The formation of self-assembled structures of C60 in solution and in the volume of an evaporating drop of a colloidal solution,” *Lithuanian Journal of Physics*, vol. 60, no. 3, pp. 194–204, Aug. 2020, doi: [10.3952/physics.v60i3.4306](https://doi.org/10.3952/physics.v60i3.4306).
- [12] G. V. Andrievsky et al., “Comparative analysis of two aqueous-colloidal solutions of C60 fullerene with help of FTIR reflectance and UV–Vis spectroscopy,” *Chemical Physics Letters*, vol. 364, no. 1–2, pp. 8–17, 2002.
- [13] D. A. Peidys, A. A. Hernandez, and M. P. Evstigneev, “The interplay of enthalpic/entropic factors in nanoparticles’ aggregation in solution : The case of fullerene C60,” *Journal of Molecular Liquids*, vol. 318, pp. 114043–114043, Nov. 2020, doi: [10.1016/j.molliq.2020.114043](https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.114043).
- [14] U. Ritter et al., “Structural Features of Highly Stable Reproducible C60 Fullerene Aqueous Colloid Solution Probed by Various Techniques,” *Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures*, vol. 23, no. 6, pp. 530–534, Jun. 2015, doi: [10.1080/1536383x.2013.870900](https://doi.org/10.1080/1536383x.2013.870900).
- [15] Y. I. Prylutskiy et al., “C60 fullerene aggregation in aqueous solution,” *Physical Chemistry Chemical Physics*, vol. 15, no. 23, pp. 9351–9360, May 2013, doi: [10.1039/C3CP50187F](https://doi.org/10.1039/C3CP50187F).

Information about the author

Nikolay A. Torkhov, Leading Researcher at the Research Laboratory “Flight Dynamics and Control of Unmanned Aerial Systems” of the Institute of the National Technology Initiative, Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation. ORCID: 0000-0001-8902-6319.

Микроволновая система посадки маневренных самолетов государственной авиации на принципах когнитивной обработки

Криворучко Ю. Т., Шатраков Ю. Г.

АО «ВНИИРА»

пр. Обуховской Обороны, д. 120, г. Санкт-Петербург, 192012, Российская Федерация
krivoruchko.yuri@mail.ru

Получено: 21 мая 2023 г.

Отрецензировано: 31 мая 2023 г.

Принято к публикации: 31 мая 2023 г.

Аннотация: В статье рассмотрена микроволновая система инструментальной посадки международного диапазона для маневренных самолетов. Подход основан на принципах когнитивной технологии, включающей совокупность процессов приобретения, преобразования и использования накопленных знаний, реализуемой на основе доверенных вычислительных СНК платформ.

Ключевые слова: микроволновая система, система посадки, государственная авиация, когнитивная обработка.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Криворучко Ю. Т., Шатраков Ю. Г. Микроволновая система посадки маневренных самолетов государственной авиации на принципах когнитивной обработки // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2023. Т. 6, № 3. С. 294—307.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Криворучко, Ю. Т. Микроволновая система посадки маневренных самолетов государственной авиации на принципах когнитивной обработки / Ю. Т. Криворучко, Ю. Г. Шатраков // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2023. — Т. 6, № 3. — С. 294—307.

1. Введение

Первая отечественная система слепой посадки метрового диапазона волн была разработана для ночных посадок бомбардировщиков ДБ-3 во время войны с Финляндией в 1939 году. Системы посадки, работающие в диапазоне метровых волн ИЛС, имели ряд характерных недостатков. В частности практика выполнения автоматических посадок требовала специального разрешения службы УВД и значительного продольного разде-

ления самолетов в пространстве при заходе на посадку в условиях плохой видимости, что существенно влияло на пропускную способность аэропортов. Это определило дальнейший переход радиомаяков, в первую очередь для военной авиации, в дециметровый диапазон [2]. В настоящее время в военной авиации РФ эксплуатируются морально устаревшие системы дециметрового диапазона ПРМГ-76. Развитие систем сотовой связи GSM-900, которые работают в этом же диапазоне, определило необходимость перевода систем РСБН/ПРМГ в международный диапазон [2].

2. Проблема создания МЛС

В результате большой подготовительной работы в 1981 году ИКАО приняла план перехода с ИЛС на принципиально новую радиомаячную систему сантиметрового диапазона волн МЛС, затем в 1986 году этот план был еще раз подтвержден. В этот же период ИКАО были разработаны и опубликованы рекомендованные стандарты на систему, включенные в Приложение 10. В нашей стране институтом ВНИИРА проводились работы по созданию соответствующего оборудования микроволновой системы посадки (МСП) «Плацидарм» и проводились ее испытания. В 1989 году система «Плацидарм» успешно прошла государственные испытания по категории III ИКАО.

В действительности до настоящего времени системы ИЛС и МЛС являются единственными системами, стандартизированными ИКАО, которые удовлетворяют требованиям обеспечения автоматической посадки по Категории III, а система МЛС является единственной альтернативой ИЛС, которая может быть сертифицирована для обеспечения наведения при посадке по Категориям I, II и III ИКАО.

В 1995 году, после того, как ряд образцов систем МЛС в США и других странах были уже запущены в эксплуатацию, Федеральное Авиационное агентство США предложило ИКАО заменить МЛС на уже казавшуюся тогда почти готовую дифференциальную спутниковую систему LAAS (DGNS). ИКАО согласилась с указанным предложением, и на Всемирной конференции в марте 1995 года принятый ранее план перехода с ИЛС на МЛС был отменен.

Однако после более чем 30-летней разработки спутниковой системы международная авиационная общественность на конференции ИКАО в 2012 г. не смогла принять ГНСС в качестве основного международного средства навигации и посадки и пришла к заключению о проведении исследований по созданию системы, альтернативной системе спутниковой навигации.

Учитывая опыт ВНИИРА в части создания микроволновой системы посадки (МСП) 2-сантиметрового и 6-сантиметрового диапазонов, в том числе создания микроволновой посадки для орбитального корабля Буран, целесообразно провести разработку МЛС, в первую очередь для государственной авиации.

В первой отечественной монографии по радиомаякам 1936 г. [1], ее автор профессор В. И. Баженов рассмотрел уникальные особенности радиомаяков сантиметрового диапазона волн на основе узконаправленных антенн. Определим набор преимуществ радиомаяков микроволнового диапазона, определяющих концепцию ее создания в современных особых условиях.

1. Повышение безопасности полетов ЛА за счет повышения точности определения навигационных параметров на основе узконаправленных диаграмм азимутальных и угломестных антенн.

2. Высокая пропускная способность (Темп выдачи информации до 39 Гц) при значительном уменьшении динамической ошибки определения навигационных параметров для высокоскоростных ЛА.

3. Экономия топлива за счет оптимизации траектории снижения при заходе на посадку.

4. Снижение влияния шума двигателей на жилые массивы, прилегающие к аэродрому за счет использования «крутых» глиссад.

5. Обеспечение регулярности полетов и снижение их стоимости в сложных метеоусловиях, в том числе в условиях арктического севера.

6. Сокращение объемов строительно-монтажных работ из-за менее строгих требований к размещению оборудования.

7. Обеспечение посадки самолетов различных типов на необорудованные аэродромы, включая посадки самолетов-заправщиков и БПЛА [3].

Современный подход на основе когнитивности, то есть совокупности процессов приобретения, преобразования и использования накопленных знаний с использованием отечественных вычислительных платформ позволяет реализовать МСП на следующих принципах:

принцип когнитивности, который определяет архитектуру, аппаратное и программное исполнение комплексов на базе накопленных теоретических знаний, опыта и учета влияния внешней среды;

принцип иерархической автономности, предусматривающий многоуровневую структуру комплекса;

принцип магистрально-модульности, обеспечивающий построение комплекса с применением базового набора аппаратных и программных модулей (ИМА).

принцип открытости архитектуры, который определяет возможность последующей модернизации комплекса путем наращивания или замены аппаратных и программных модулей.

Введение когнитивной обработки сигналов в азимутальном и угло-местном каналах может быть реализовано на представленной на рис. 1 микро-ЭВМ.

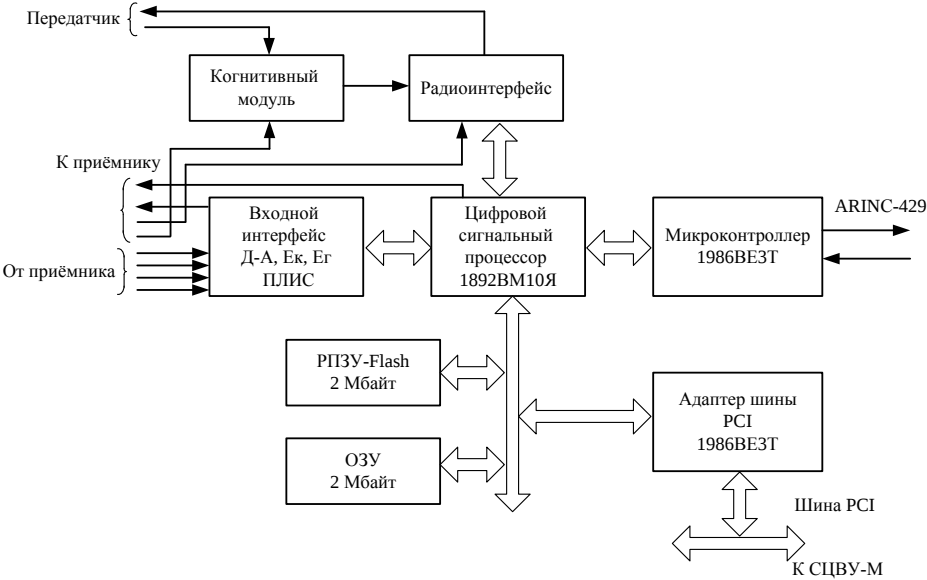


Рис. 1. Когнитивная микро-ЭВМ с обработкой сигналов посадки МСП.

Fig. 1. Cognitive micro-computer with signal processing of the microwave landing system

Микро-ЭВМ реализована на микропроцессорном комплекте «Мультикор», который получил значительное развитие, в том числе и в космической сфере. Особенностью комплекта является реализация в одном чипе сигнального процессора и вычислительного процессора для вторичной обработки сигналов и информации. Представляется, что для государственной авиации необходима мобильная МЛС, которая заменит существующие мобильные системы дециметрового диапазона [2].

3. Требования к мобильной МЛС

Наименование ТТХ	СПМ-М
1 Частотный диапазон	5030—5091 МГц
2 Зона действия: — по азимуту	±40°

Наименование ТТХ	СПМ-М
— по углу места — по дальности	от 0,9 до 15° не менее 37 км
3 Ширина луча по азимуту	не более 2,8°
4 Ширина луча по углу места	не более 2,2°
5 Погрешности наведения (системные, с P = 95 %) — погрешность следования по траектории — шумы следования по траектории — шумы системы управления	По азимуту: ±8,4 м ±3,2 м ±3,2 м
6 Погрешности наведения (системные, с P = 95 %) — погрешность следования по траектории — шумы следования по траектории — шумы системы управления	По углу места: ±0,173° ±0,053° ±0,06°
7 Время обнаружения аварийного состояния — по азимуту — по углу места	не более 1 сек не более 1 сек
8 Классы обслуживаемых ВПП	I, II, III (длиной до 3500 м)
9 Расчет для свертывания/развертывания	3 чел.
10 Время свертывания/развертывания оборудования	2—4 часа

4. Оценка точности измерения координат ВС при работе МЛС

Точность измерения угловых координат ВС, находящегося в зоне МЛС, определяется средеквадратической ошибкой по формуле

$$\sigma = \sqrt{\sigma_n^2 + \sigma_a^2}, \quad (1)$$

где σ_n — потенциальная составляющая ошибки;

σ_a — аппаратурная составляющая ошибки.

При этом предполагается, что систематические ошибки учитываются при калибровке аппаратуры.

Аппаратурные или инструментальные ошибки вызваны несовершенством техники изготовления аппаратуры и методов отсчета. Они связаны с нелинейностью устройств обработки, дискретностью отсчета, нестабильностью работы отдельных элементов. Потенциальная (флуктуационная) составляющая ошибки определяется видом используемого сигнала и соотношением сигнал/шум на выходе приемника, а также влиянием помех, в частности, отражений от предметов на местности.

В МЛС точность измерения координат ВС связана как с погрешностями определения местоположения (азимута, угла места и дальности), так и с неправильной дешифрацией содержащихся в преамбуле кодовых сообщений: кода Баркера, обеспечивающего синхронизацию приемника (5

разрядов), кода идентификации функций, обеспечивающего правильную идентификацию измерений радиомаяков (7 разрядов), а также кода, содержащего основные данные (32 разряда). Особенно существенно на точность захода на посадку может повлиять неправильная дешифрация минимального угла глиссады, установки нуля азимута и коэффициента чувствительности к смещению сигнала, который вычисляется в зависимости от расстояния между азимутальным маяком и торцом ВПП. Неправильное декодирование этой информации может привести к ошибкам, превышающим 5 СКО, то есть к нарушению целостности системы и выходу за внешние границы «туннеля» посадки.

В наземном оборудовании основная часть погрешности приходится на погрешность установки статической диаграммы направленности фазированной антенной решетки, дискретности фазовращателя и алгоритма фазирования.

На борту угловые координаты определяются по огибающей динамической диаграммы направленности, которая для каждого углового положения ВС складывается из множества статистических диаграмм. При этом источниками ошибок измерений являются шумы приемника, дискретность измерений и перемещения диаграммы направленности антенны, ошибки фиксации временного положения импульсов сканирования и искажения их фронтов, нестабильность частоты, а также рассеивание сигнала и его переотражения от предметов на местности.

Ошибка измерения угловых координат МЛС расфилтровывается на две составляющие, которые по разному влияют на точность посадки:

PFE — часть погрешности, приводящая к смещению ВС с заданной траектории посадки и состоящая из шума следования по траектории и смещения самой траектории относительно заданной. Эта ошибка зависит от:

- дискретности шага сканирования (при шаге сканирования антенны 0,78 мкс и определении точки пересечения порога с импульсом с шагом 0,02 мкс суммарная ошибка находится в пределах $-0,8...+0,8$ мкс);

- ошибки центрирования антенны;

- дрейфа антенны;

- переотражений от предметов на местности (для определения азимута);

- отражения от поверхности земли (для определения угла места);

- центровки бортового приемника.

CMN — часть погрешности, воздействующая на органы управления ВС, но не вызывающая смещения траектории. Ошибки *CMN* зависят от:

- ветровой нагрузки на антенну;

- переотражений от предметов на местности;

- отношения сигнал/шум в приемнике.

Определение этих ошибок основывается на проведении спектрального анализа ошибок измерений и проведении фильтрации измерений через сглаживающий фильтр, фильтр следования по траектории (выделение *PFE*) и фильтр движения поверхностей управления (выделение *CMN*).

Искажение кодовых комбинаций преамбулы может привести к невозможности использования информации МЛС. Степень искажения кодовой комбинации, то есть ее достоверность, оценивается вероятностью ошибки в n -разрядном кодовом сообщении — $P_{\text{ош}}$. Требуемое значение вероятности необнаружения ошибки, остающейся после процесса дешифрации в приемнике МЛС, установлено Комитетом по всепогодным операциям *ICAO*: не более 10^{-6} при минимальной мощности сигнала и не более 10^{-9} в критических точках захода на посадку.

Для определения точностных характеристик МЛС на разных этапах проектирования применялись различные методы.

Натурное и полунатурное моделирование системы. Как показали результаты моделирования, наземное оборудование вносит только низкочастотную составляющую (*PFE*), так как вносимая ФАР высокочастотная составляющая (*CMN*) соизмерима с соответствующей составляющей бортовой аппаратуры и методами вторичной обработки (фильтрацией) может быть сведена к минимуму.

Для бортовой аппаратуры наиболее значительными факторами, определяющими точность, являются:

- уровень ВЧ-сигнала (шумовая составляющая);
- скорость изменения углового положения ВС;
- форма огибающей ВЧ-сигнала на выходе.

Статистическое моделирование на математической модели бортовой аппаратуры МЛС.

Разработанная математическая модель включала две части:

1. Модель оценки точности обработки сигналов, содержащих импульсы сканирования. Модель включает следующие блоки:

- имитацию движения ВС в зоне с расчетом временного положения прямого и отраженного сигналов относительно момента начала сканирования в одном направлении и сигналов от местных предметов;
- формирование суммарного сигнала на выходе фильтра НЧ в моменты, отстоящие друг от друга на шаг сканирования;
- сравнение сигнала с порогом и определение моментов пересечения фронтов сигнала с порогом;
- определение несовпадений обнаруженных импульсов со стробами, сформированными по импульсам предыдущего цикла;

- счет обнаруженных импульсов и определение измеряемого угла;
- фильтрация измерений с выделением составляющих *PFE* и *CMN*;
- статистическая обработка результатов моделирования с определением МО и СКО ошибки и ее составляющих.

2. Модель оценки вероятности необнаружения кодов преамбулы и точности дешифровки кода Баркера.

В результате проведенного моделирования было показано:

- ошибки измерений не превышают $0,015^\circ$, а при отношении с/ш на выходе детектора ≥ 35 дБ составляют $0,01^\circ$;

- ошибка измерений существенно зависит от уровня и метода фиксации сигнала и относительного положения отражающих объектов.

При этом показано, что метод определения центра импульса по центру площади импульса имеет в 1,5—2 раза меньшие ошибки, чем метод фиксации по пересечению фронтов. Некоторое повышение точности (в 1,2—1,3 раза) может быть получено за счет применения интерполяции для определения точек заданного уровня на фронте и срезе импульсов, так как за счет шумов может иметь место несколько пересечений импульса с заданным уровнем порога.

5. Аналитический расчет ошибок

5.1. Оценка шумовой составляющей ошибки (*CMN*)

Аналитическая оценка позволяет определять шумовую составляющую флюктуационной ошибки, которая является основной ее составляющей, так как ошибки, связанные с распространением радиоволн и многолучевым распространением при небольших дальностях, невелики.

Для аналитической оценки СКО шумовой составляющей ошибки измерения применима формула

$$\sigma = \frac{\Delta\theta^0}{2 \cdot \sqrt{h \cdot g}} = \frac{\Delta\theta_{0,7}^0}{2 \cdot \sqrt{h_{nc} \cdot \frac{B_{пч}}{2B_{видео}} \cdot \frac{F}{\Delta F}}}, \text{ где} \quad (2)$$

h — отношение сигнал/шум на фильтре огибающей;

g — отношение выборочной частоты функции к ширине полосы шума выходного фильтра приемника, которая в $\pi/2$ раз превышает ширину полосы 3 дБ;

$\Delta\theta$ — ширина луча антенны в градусах;

$B_{пч}$ — полоса пропускания усилителя ПЧ (26 кГц);

$B_{видео}$ — полоса пропускания видеоусилителя (20 кГц);

F — частота обновления данных (13,5 Гц для азимута);

ΔF — полоса среза выходного фильтра приемника (1,6 Гц).

Отношение сигнал/шум на входе приемника определяется формулой

$$h = \frac{2 \cdot P_1 \cdot \lambda^2 \cdot G_1 \cdot G_2 \cdot \beta}{16 \cdot \pi^2 \cdot P_2 \cdot D^2 \cdot \rho \cdot L}, \text{ где} \quad (3)$$

P_1 — мощность передатчика;

P_2 — чувствительность приемника;

G_1, G_2 — коэффициенты усиления передающей и приемной антенн;

$L = L_1 + L_2$ — потери в передающей и приемной АФС;

λ — длина волны;

D — дальность передачи сигнала;

ρ — потери при несогласованной фильтрации;

β — потери при распространении радиоволн в атмосфере, зависящие от дальности до ВС и длины волны, при $\lambda = 0,06$ м (5100 МГц) $\beta = 10^{-0,03 D}$.

Шаговая развертка приводит к дискретности отсчета и искажению формы сигнала. При ширине луча 1° , скорости развертки 0,02 град/мкс и ширине полосы пропускания 20 кГц погрешность из-за искажения формы сигнала мала.

Погрешность за счет дискретности отсчета зависит от ширины шага развертки — $\Delta\theta$ и ширины луча при пороговом значении — $\Delta\alpha$. СКО погрешности равно :

$$\sigma = \sqrt{\frac{\Delta\theta^2}{12} - \frac{c\Delta\theta}{2} + c^2}, \quad (4)$$

$$\text{где } c = \min \{a, b\}, \quad a = \frac{\Delta\alpha}{2} - \Delta\theta \cdot \left[\frac{\Delta\alpha}{2\Delta\theta} \right]^4, \quad b = \Delta\alpha - a.$$

5.2. Оценка PFE при наличии переотражений от местных предметов

Ошибка определения линии курса связана с угловым отклонением максимума диаграммы направленности (φ) от линии, совпадающей с осью ВПП, и может быть определена по формуле

$$\varepsilon = \kappa/2 \cdot \left| \frac{f(\varphi + \varphi_t)}{f(\varphi)} \right|, \text{ где} \quad (5)$$

κ — модуль отношения поля, отраженного от препятствия, к основному полю в месте приема;

$f(\varphi)$ — диаграмма направленности антенны;

φ_t — угловое положение местного предмета.

Ошибка указания линии курса тем меньше, чем больше крутизна диаграммы направленности в месте приема.

5.3. Оценка ошибок МЛС при заходе на посадку по вычисленным траекториям

Заход на посадку может производиться по вычисленным траекториям, в частности, по вычисленной осевой линии.

В отличие от захода по глиссаде вдоль оси ВПП при заходе по вычисленной траектории бюджет ошибок кроме ошибок, входящих в состав системы элементов (азимутального и угломестного маяком и дальномера), включает погрешности расчетов в вычислителе системы, ошибки, связанные с расположением элементов МЛС, то есть геометрию наземной системы и зависит от направления полета ВС.

Требования к ошибкам для этого случая задаются в виде суммарной ошибки местоположения в горизонтальной плоскости (в точке на высоте 60 м над точкой начала отсчета МЛС при угле глиссады 3°) и составляют ± 15 м в горизонтальной плоскости и $\pm 3,7$ м в вертикальной плоскости (для 95 % измерений). При этом погрешность *CMN* не должна превышать $\pm 7,3$ м в горизонтальной плоскости, $\pm 1,9$ м в вертикальной плоскости.

Чтобы сравнить возможности МЛС с заданными требованиями необходимо произвести пересчет координат МЛС (азимут — α , угол места — θ , дальность — R) в прямоугольную систему координат — X, Y, Z .

Алгоритм пересчета координат основан на решении системы уравнений, позволяющей найти точку пересечения трех поверхностей

$$\begin{aligned}(x - dx_R)^2 + (z - dz_R)^2 + y^2 &= R^2 \\ y - dy_\theta &= \operatorname{tg} \theta \cdot \sqrt{(x - dx_\theta)^2 + (z - dz_\theta)^2} \\ z - dz_\alpha &= \operatorname{tg} \alpha \cdot (x - dx_\alpha)\end{aligned}\tag{6}$$

где $dx_R, dz_R, dy_\theta, dz_\theta, dx_\alpha, dz_\alpha$ — координаты точек стояния *DME-P*, азимутального и угломестного радиомаяков.

6. Требования к точности МЛС и ее элементов

Требования к точности систем посадки определяются допустимыми отклонениями ВС на участке визуального снижения и в точке приземления, а также минимальных и максимальных углов снижения по глиссаде. Все эти характеристики зависят от категории захода на посадку.

Исходя из этих допустимых отклонений, определяются требования к характеристикам сигнала при заходе на посадку в горизонтальной и вертикальной плоскостях, которые приведены в таблице 1.

Таблица 1. Требования к характеристикам сигнала при заходе на посадку.

Table 1. Approach signal performance requirements

Типовая операция	Начальный и неточный заход на посадку	Точный заход на посадку по 1-й категории	Точный заход на посадку по 2-й категории	Точный заход на посадку по 3-й категории
Точность в горизонтальной плоскости, 95 %	220 м	В 30 м от поверхности Земли 16 м (9,1 м)	В 15 м от поверхности Земли 6,9 м (4,6 м)	В 0 м от поверхности Земли 6,1 м (4,1 м)
Точность в вертикальной плоскости, 95 %	нет	6—4 м (3 м)	2 м (1,4 м)	2 м (0,5 м)

Приведенные в таблице требования трансформируются в требования к точности определения азимута, угла места и дальности, с разделением на составляющие *PFE*, *PFN*, *CMN*, которые приведены в таблицах 2, 3.

Таблица 2. Требования к точности определения азимута (допустимые ошибки — 95 %).

Table 2. Requirements for the accuracy of determining the azimuth (permissible errors – 95%)

Дистанция от ВПП	<i>PFE</i>	<i>PFN</i>	<i>CMN</i>
0 км (на высоте 15 м)	6 м (0,17°)	3,5 м	3,2 м
1 км (АРД)	7 м		
37 км	8,4 м		0,1°
Допустимое снижение точности на краях зоны	Линейно до ± 40 градусов, максимальная ошибка на краях зоны увеличивается в 1,5 раза		

Таблица 3. Требования к точности определения угла места (допустимые ошибки — 95 %).

Table 3. Requirements for the accuracy of determining the elevation angle (permissible errors – 95%)

Дистанция от ВПП	<i>PFE</i>	<i>PFN</i>	<i>CMN</i>
0 км (на высоте 15 м)	0,6 м (0,057°)	0,4 м	0,3 м (0,05°—0,07°)
1 км (АРД)	0,133°		0,066°
37 км	0,16°		0,1°
Допустимое снижение точности на краях зоны	Линейно до ± 40 градусов, максимальная ошибка на краях зоны по азимуту для <i>PFE</i> увеличивается в 1,2 раза, для <i>CMN</i> — в 2 раза. На предельной дальности — в 2 раза		

Зависимость СКО ошибок в пределах зоны выражается формулами:

$$\sigma_{PFE} = 6 \cdot \left(1 + \frac{D}{37}\right) \cdot \left(1 + 0,5 \cdot \frac{|A|}{40}\right) \cdot Ka, \quad (7)$$

$$\sigma_{CMN} = 3,2 \cdot \left(1 + 0,3 \cdot \frac{D}{18,5}\right) \cdot \left(1 + 0,3 \cdot \frac{|A|}{40}\right). \quad (8)$$

Ка = 1 при угле места θ меньше 9° ; $1+(9^\circ - \theta) 16^\circ$ — при $9^\circ \leq \theta \leq 15^\circ$; 2 — при $\theta > 15^\circ$.

$$\sigma_{PFE} = [PFE_\varepsilon + (0,2 - PFE_\varepsilon) \cdot \frac{D}{37}] \cdot (1 + 0,3 \cdot \frac{|A|}{40}),$$

$$PFE_\varepsilon = 0,6 \cdot (1 + \frac{\varepsilon - \varepsilon_1}{15 - \varepsilon_1}) \text{ при } \varepsilon \geq \varepsilon_1 \quad (9)$$

$$PFE_\varepsilon = 0,6 \cdot (6 - 5 \cdot \frac{\varepsilon - 0,9}{0,6\varepsilon_1 - 0,9}) \text{ при } \varepsilon \leq 0,6\varepsilon_1.$$

$$\sigma_{CBT} = CMN_\varepsilon \cdot (1 + 0,3 \cdot \frac{D}{18,5}) \cdot (1 + 0,3 \cdot \frac{|A|}{40}),$$

$$CMN_\varepsilon = 0,07^0 \text{ при } |CMN_\varepsilon| \geq 0,07^0,$$

$$CMN_\varepsilon = 0,3 \cdot (1 + \frac{\varepsilon - \varepsilon_1}{15^0 - \varepsilon_1}),$$

$$CMN_\varepsilon = 0,3 \cdot (6 - 5 \cdot \frac{\varepsilon - 0,9}{0,6 \cdot \varepsilon_1 - 0,9}). \quad (10)$$

7. Заключение

Создание мобильной микроволновой системы посадки является актуальной научно-технической задачей в целях повышения эффективности применения государственной авиации, в том числе во время локальных военных действий и дальнейшего развития ЛА, включая самолеты специального назначения типа БПЛА.

Список литературы

1. Баженов В. И., Мясоедов Н. А. Радиомаяки. М. : Госиздат по технике связи, 1936. 672 с.
2. Ершов Г. А., Король В. М., Криворучко Ю. Т., Максименко М. Д., Переломов В. Н., Сеницын Е. А., Шатраков Ю. Г. Радиомаячная система инструментального захода воздушных судов на посадку категории II для работы в дециметровом отечественном и международном диапазонах волн ПРМГ-ОМД // Новости навигации. 2017. № 1. С. 16—19.
3. Криворучко Ю. Т., Музелин Ю. Н., Пономаренко Б. В. Совершенствование систем и средств посадки высокоманевренных летательных аппаратов классов 4++ и 5 // Новости навигации. 2018. № 3. С. 17—26.
4. Пахолков Г. А., Збрицкая Г. Е., Криворучко Ю. Т., Пономаренко Б. В., Шатраков Ю. Г. Обработка сигналов в радиотехнических системах ближней навигации. М. : Радио и связь, 1992. 256 с.

Информация об авторах

Криворучко Юрий Тимофеевич, д. т. н., профессор Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации, главный конструктор систем навигации и посадки АО «ВНИИРА», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

Шатраков Юрий Григорьевич, д. т. н., профессор, АО «ВНИИРА», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

Microwave Radio Beacon Instrument Approach Landing System for the Highly-Maneuverable Aircrafts on Principles of the Cognitive Processing

Y. T. Krivoruchko and Y. G. Shatrakov

All-Russian Scientific Research Institute of Radio Equipment, JSC
120, Obukhovskoy Oborony Prospect, St. Petersburg, 192012, Russian Federation
krivoruchko.yuri@mail.ru

Received: May 21, 2023

Peer-reviewed: May 31, 2023

Accepted: May 31, 2023

Abstract: The article considers an international range microwave instrument landing system for maneuverable aircraft. The approach is based on the principles of cognitive technology, which includes a set of processes for acquiring, transforming and using accumulated knowledge, implemented on the basis of trusted computing SoC platforms.

Keywords: microwave radio beacon instrument approach landing system, state aviation, cognitive processing.

For citation (IEEE): Y. T. Krivoruchko and Y. G. Shatrakov, "Microwave Radio Beacon Instrument Approach Landing System for the Highly-Maneuverable Aircrafts on Principles of the Cognitive Processing," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 6, no. 3, pp. 294–307, 2023, doi: 10.29039/2587-9936.2023.06.3.23. (In Russ.).

References

- [1] V. I. Bazhenov and N. A. Myasoyedov, *Radio Beacons*. Moscow : Gosizdat, 1936. (In Russ.).
- [2] G. A. Ershov et al., "Radio beacon instrument category II approach system for domestic and international UNF range wave PRMG-UNF," *Navigation News*, no. 1, pp. 16–19, 2017. (In Russ.).
- [3] Y. T. Krivoruchko, Y. N. Muzelin, and B. V. Ponomarenko, "The Perfection of the Systems and the Equipment for the Approach of Highly-Maneuverable Generations 4++ and 5 Aircrafts," *Navigation News*, no. 3, 2018, pp. 17–26. (In Russ.).
- [4] G. A. Pakholkov, G. E. Zbritskaia, Y. T. Krivoruchko, B. V. Ponomarenko, and Y. G. Shatrakov, *Signal processing in radio systems of short-range navigation*. Moscow : Radio i Svyaz, 1992. (In Russ.).

Information about the authors

Yuri T. Krivoruchko, Dr. Tech. Sc., Professor of St. Petersburg State University of Civil Aviation, chief designer of navigation and landing systems of JRC "VNIIRA", St. Petersburg, Russian Federation.

Yuri G. Shatrakov, Dr. Tech. Sc., Professor, JRC "VNIIRA", St. Petersburg, Russian Federation.

Infocommunications and Radio Technologies, vol. 6, no. 3, pp. 308–326, 2023.

Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2023. Т. 6, № 3. С. 308—326.

ISSN: 2587-9936

DOI: 10.29039/2587-9936.2023.06.3.24

УДК 621.37(09)

У истоков отечественной радиоэлектроники

Золотинкина Л. И.

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

им. В. И. Ульянова (Ленина)

ул. Профессора Попова, 5, 197022, Российская Федерация

radioemc@yandex.ru

Получено: 20 мая 2023 г.

Отрецензировано: 31 мая 2023 г.

Принято к публикации: 31 мая 2023 г.

Аннотация: Одной из первых отечественных радиоэлектронных систем стала первая ламповая система связи «Блокада-1» для Морских Сил рабоче-крестьянского Красного Флота (МС РККФ), создателем научно-обоснованной концепции построения и реализации которой был первый председатель секции связи Научно-технического комитета МС РККФ профессор Имант Георгиевич Фрейман — заведующий (1917—1929) первой в России кафедры радиотехники Электротехнического института им. В. И. Ульянова (Ленина), прямой наследник дела А. С. Попова во всех областях их научной и общественной деятельности. Научно-исследовательская и педагогическая деятельность И. Г. Фреймана, включающая и активную экспериментальную работу, дает основание определить его роль в истории радиотехники и радиоэлектроники как основателя научно-инженерной школы радиотехники в России.

Ключевые слова: радиотехника, радиофизика, электронная лампа, радиоэлектроника, И. Г. Фрейман, А. С. Попов, «Блокада-1», излучение электромагнитных волн, распространение радиоволн, ЛЭТИ им. В. И. Ульянова (Ленина), Научно-технический комитет Морских сил.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Золотинкина Л. И. У истоков отечественной радиоэлектроники // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2023. Т. 6, № 3. С. 308—326.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Золотинкина, Л. И. У истоков отечественной радиоэлектроники / Л. И. Золотинкина // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2023. — Т. 6, № 3. — С. 308—326.

1. Введение

Большая советская энциклопедия определяет термин «радиоэлектроника» как термин, объединяющий обширный комплекс областей науки

и техники, связанных главным образом с проблемами передачи, приема и преобразования информации с помощью электромагнитных волн; радиоэлектроника перекрывается по диапазонам частот с электроакустикой.

К первому такому устройству мы можем отнести «телефонный приемник депеш», запатентованный А. С. Поповым в ведущих европейских странах и в США, в котором прием информации в виде комбинаций телеграфного кода, передаваемого с помощью электромагнитных волн, осуществлялся с помощью первого в мире (в современной терминологии) полупроводникового диода и передавался на телефонные наушники [1].

Одной из первых отечественных радиоэлектронных систем стала первая ламповая система связи «Блокада-1» для Морских Сил рабочекрестьянского Красного Флота (МС РККФ), создателем научнообоснованной концепции построения и реализации которой был первый председатель секции связи Научно-технического комитета МС РККФ профессор Имант Георгиевич Фрейман — заведующий (1917—1929) первой в России кафедрой радиотехники Электротехнического института им. В. И. Ульянова (Ленина) [2].

Основная и наиболее яркая часть недолгой и очень интенсивной творческой жизни И. Г. Фреймана (1890—1929) совпала со временем коренного технического переворота в истории развития радиотехники: переходом от техники затухающих колебаний с ее чисто эмпирическими основами проектирования к применению незатухающих электромагнитных колебаний. Радиотехника во всем мире в начале XX века развивалась очень бурно. Однако многочисленные статьи, опубликованные большей частью в зарубежных журналах, в основном были посвящены решению конкретных вопросов — изобретению и построению новых приемных или передающих устройств, новых электронных приборов, других составляющих радиосистем. Не было научных работ, объединяющих все необходимые сведения для научно-обоснованного подхода к решению практических задач радиотехники, «совмещающих знакомство с задачами, как теоретическими, так и узкопрактическими».

И первый в мире такой фундаментальный труд — «Курс радиотехники», изданный дважды (в 1924 и в 1928 гг.) — создал профессор Ленинградского электротехнического института (ЛЭТИ) им. В. И. Ульянова (Ленина), заведующий первой в России кафедрой радиотехники Имант Георгиевич Фрейман [3, 4]. Он заложил основы научно-инженерного подхода к решению практических задач радиотехники. Его лекции, освещавшие новые вопросы радиотехники, формировали и новые курсы, которые уже читали и развивали его ученики.

В числе его учеников — выпускники ЛЭТИ: академики АН СССР А. А. Харкевич, А. Н. Щукин, члены-корреспонденты АН СССР В. И. Си-форов, С. Я. Соколов, профессора Б. П. Асеев, Н. С. Бесчастнов, М. П. До-луханов, Н. М. Изюмов, М. Ф. Конторович, В. Н. Лепешинская, Е. Г. Мо-мот, С. И. Панфилов, А. Ф. Шорин, Е. Я. Щеголев и другие. Многие из них создали и свои научные школы. Многие выпускники кафедры радио-техники, разделенной в 1925 году на две — кафедру специального курса радиотехники, заведующий — проф. И. Г. Фрейман, и кафедру общей радиотехники, заведующий — проф. Н. А. Скрицкий (1878—1951) — стали руководителями и ведущими специалистами радиотехнических предприятий.

В 1960-х годах было несколько попыток издать книгу об И. Г. Фрей-мане. В рецензии на одну из них историк науки проф. Б. А. Остроумов писал: «Несомненно, что книга, отдающая должное трудам этого выдающегося ученого, пионера современной радиотехники, как его часто называют, «учи-теля всех учителей от радиотехники», необходима. Без нее история совет-ской радиотехники остается неполной и может оказаться превратной» [5].

В понятие «радиотехника» И. Г. Фрейман вносил гораздо более глу-бокий смысл, чем просто передача сообщений без проводов (радиотеле-графия и радиотелефония). В первом издании его замечательной книги «Курс радиотехники» (1924), Имант Георгиевич дает определение радио-техники как «совокупности технических приемов, которые позволяют пе-редавать электрическую энергию без помощи соединительного провода между источником и потребителем и использовать такую беспроводно передаваемую электрическую энергию» [3]. По свидетельству историка радиотехники проф. И. В. Бренева (1974), именно Имант Георгиевич ввел понятие «радиотехника» — это определение новой науки вместо «беспро-водной телеграфии», «радиотелеграфии» или «радиотелефонии» [16].

Рассмотрение списка научных трудов И. Г. Фреймана, анализ их со-держания показывает, что научные труды ученого можно соотнести со следующими современными рубриками: радиофизика, электроника, об-щие вопросы радиотехники.

2. От искры и дуги к электронной лампе

Имант Георгиевич Фрейман в полной мере следовал завету профес-сора А.С. Попова — фундаментальная теория Максвелла — Герца стала настоящим инструментом в его дальнейшей инженерной и научной дея-тельности. Теория Максвелла получила дальнейшее развитие в трудах Г. Герца и Х. Лоренца, в результате чего была создана электродинамиче-

ская картина мира. С 1895 по 1904 годы шла череда революционных открытий и изменений во взглядах на природу вещей, происходил переход к новой, современной физике, фундамент которой заложили специальная теория относительности и квантовая теория. Было положено начало созданию новой физической картины мира — квантово-релятивистской. Больше всего Фреймана увлекала теория электромагнитного поля, физика процессов переноса электромагнитной энергии.

Назначенный после окончания Электротехнического института императора Александра III (ЭТИ) помощником делопроизводителя Междудоведомственного радиотелеграфного комитета (МРК), И. Г. Фрейман прошел хорошую школу научной и организаторской работы, впитал самые передовые идеи, появлявшиеся в физике, в радиотехнике. Из записей в журналах заседаний МРК видно, что научные дискуссии, которые возникали при принятии решений, были достаточно частыми и весьма бурными. В значительной степени именно благодаря связям, появившимся за время работы в МРК (1913—1918), у Иманта Георгиевича сформировался широкий круг общения в сфере его профессиональных интересов [6, 7].

Появление генераторов незатухающих колебаний открывало новые возможности к развитию способов телефонирования без проводов. На третьем съезде инженеров-электриков, выпускников ЭТИ, состоявшемся в 1915 году, И. Г. Фрейман выступил дважды: с докладом «Современное состояние беспроводного телефонирования» и сообщением «К последнему успеху радиотелефонирования» о работах в этом направлении в Америке, в которых особое внимание уделил перспективности применения нового электронного прибора — пустотного реле. [8, 9].

С 1915 года Имант Георгиевич сотрудничал с научно-исследовательской лабораторией Радиотелеграфного депо Морского ведомства, открытого в Петербурге на базе Кронштадтской мастерской для изготовления и ремонта приборов телеграфирования без проводов (1900). Именно представители флота инициировали и, хотя и с трудом, продвигали развитие практических и научных работ в области радиотехники (А. С. Попов, А. А. Реммерт, И. И. Ренгартен, А. А. Петровский и др.).

Публикуемые в период с 1915 по 1924 годы статьи и книги И. Г. Фреймана отражают практически все этапы перехода от искровых и дуговых методов генерирования электромагнитных колебаний, которые он изучал еще в студенческие годы в ЭТИ, к электромашинным и электронно-ламповым [10, 11, 12].

В статье «Основные задачи для машин высокой частоты для радиопередачи», в которой он, исходя из «общности задачи, которая ставится всем подобным машинам (*генераторам высокочастотных колебаний* —

Л. 3.), и которая состоит в возбуждении незатухающих колебаний в радиосети» определяет, с инженерной точки зрения, некоторые общие требования к проектированию машин. И. Г. приводит расчеты, подчеркивая при этом, что «сеть является наиболее существенным органом радиоустановки, требующим со стороны других органов, в частности генератора колебаний, подчинения. Свойства же радиосети не могут изменяться беспредельно по желанию, и именно в двух важных отношениях, в отношении эффективной высоты и емкости они встречают предел, ставящийся конструктивными соображениями» [10].

Дальнейший путь развития радиоаппаратуры Имант Георгиевич видел в применении электронной лампы. В статье «Приложение электронного реле в радиотелеграфном деле», опубликованной в журнале «Морской сборник», он подробно и очень доступно объясняет устройство и работу нового прибора, рассматривает варианты его применения в радиотехнике: — как усилителя переменного тока, — как генератора колебаний высокой частоты, — как выпрямителя колебаний высокой частоты [12]. В начале 1917 г. вышла в свет небольшая брошюра Иманта Георгиевича «Краткий очерк основ радиотехники», в которой были изложены физические основы беспроводной передачи энергии, особое внимание уделялось описанию процесса формирования электромагнитного излучения и обзору технических средств, обеспечивающих его генерирование. В разделе, посвященном генераторам высокочастотных электромагнитных колебаний, особо отмечается возможность использования для этой цели электронной лампы [14].

Еще летом 1919 г. И. Г. Фрейман подал заявку на «Устройство для многократного телефонирования», патент на устройство он получил только в 1925 г. (Патент № 787 от 30 октября 1925 г.) [15]. Устройство давало возможность коммутации каналов передачи сигналов путем применения катодных трубок-распределителей; каждая из них имела ряд электродов, на которые под действием вращающегося электрического или магнитного поля поочередно падает катодный поток. Эти катодные трубки-распределители включаются в телефонные линии своими катодами и электродами с целью попеременного присоединения абонентов к линии при помощи вращающегося катодного потока, а для обеспечения их синхронизма используется общий источник высокой частоты, дающий ток для обоих катодных распределителей на том и на другом конце линии. Это изобретение намного опередило свое время. Информации о его практической реализации не выявлено.

В 1921 году И. Г. Фрейман защищает магистерскую диссертацию на тему «О законах подобия радиосетей», получает должность профессора и

заведующего кафедрой радиотехники ЭТИ. Надо отметить, что уже с 27 ноября 1917 года он практически исполнял должность заведующего образованной в декабре 1916 года кафедры радиотелеграфных станций в связи с отсутствием проф. Н. А. Скрицкого, «застрявшего» во Владивостоке на строительстве мощной радиостанции для Морского ведомства [6].

Электротехнический институт должен был выпускать инженеров, способных рассчитать и проектировать радиоаппаратуру на всех этапах ее разработки и эксплуатации. Для этого необходимо было подготовить соответствующие курсы лекций, составить учебник по всем разделам радиотехники. В 1921—1928 годах Имант Георгиевич вел общие и специальные курсы радиотехники, а также смежные дисциплины (электровакуумные приборы, радиоизмерения). В те годы чтение этих курсов означало, в сущности, создание новых научных дисциплин. При кафедре радиотехники в 1921 году была организована и первая в России научно-учебная электровакуумная лаборатория [6].

Сравнительный анализ отечественной и зарубежной библиографии начала 1920-х годов показывает, что в России имело место явное отставание в научных разработках по этим вопросам. Число оригинальных работ было незначительным, в основном наши журналы печатали переводы статей зарубежных ученых.

3. «Курс радиотехники»

Для разработки курсов лекций и методики проведения практических занятий с будущими инженерами-радиотехниками требовался новый инженерный подход к изложению теории распространения электромагнитных волн и основам расчета радиоаппаратуры и радиосооружений, уход от «царившего тогда эмпиризма». Об этом И. Г. Фрейман пишет в предисловии к первому изданию «Курса радиотехники» (1924 г.) Разрабатывая курсы лекций, Имант Георгиевич стремился к тому, чтобы студенты ЭТИ и слушатели военных академий, где он преподавал (Военно-морской и Военной электротехнической, будущей Военной академии связи им. С. Я. Будённого), представляли всю совокупность задач, возникающих при разработке радиотехнических систем, могли найти способы их практического решения с инженерной точки зрения.

Прекрасное владение основными европейскими языками и японским, который он изучил во время работ по строительству Владивостокской радиостанции, позволило Иманту Георгиевичу использовать весь накопленный к этому времени опыт мировой науки по радиотехнике. Принятый им подход к построению «Курса» в значительной степени осно-

вывался на результатах работ японского ученого Шенкичи Кимура 1912—1913 гг. «Он впервые собрал имеющиеся экспериментальные и теоретические данные в стройное целое технического расчета радиопередачи. Его-то и следует по справедливости считать основателем радиотехники как самостоятельной научно-обоснованной отрасли техники» [3].

Надо отметить, что уже в первом издании «Курса радиотехники» были намечены основные пути инженерного расчета лампового генератора. Обосновывая возможности использования электронной лампы для этой цели, И. Г. Фрейман рассматривает процесс формирования электронного потока в лампе, математически описывает условия ее работы в режиме генерирования колебаний, излагает основы разработанной им «Методики расчета лампового генератора», получившей свое завершение во втором издании «Курса» 1928 г. Проф. А. А. Чернышев в своей рецензии, в частности, писал: «С выходом из печати курса проф. И. Г. Фреймана восполняется существенный пробел в русской технической литературе, посвященной вопросам радиотехники. Труд этот представляет оригинально построенный специальный курс радиотехники, изучение которого позволяет не только основательно ознакомиться с современным состоянием этой важной отрасли электротехники, но также в значительной степени дает читателю возможность подготовиться к самостоятельному решению технических задач по проектированию и исследованию радиотехнических сооружений» [17].

Фрейман раскрывает и горизонты развития радиотехники. В современной терминологии эти вопросы можно отнести к задачам, рассматриваемым в радиофизике. «Дальнейшие вопросы, входящие в содержание радиотехники, касаются излучения энергии, ее приема из пространств и использования. Оказывается, что энергия излучается в электромагнитной форме не только при искусственном пропускании переменного тока по определенным проводам, но и при очень многих естественных процессах местного, всемирного и космического масштаба. Ввиду этого, почти во всякое время и почти во всяком месте на поверхности нашей земли в диэлектрической среде происходят электромагнитные дрожания, которые воспринимаются радиоприемными устройствами. Для исследователей и любителей природы эта невольная тесная связь радиотехники с электромагнитной жизнью мира представляется весьма ценной, для техников же, ставящих своей целью использовать радиопередачу для совершенно определенных, наперед заданных действий, возникает задача борьбы со всякими возможными видами произвольного вмешательства сил природы» [3, с. 9].

Необходимо отметить, что до появления этой книги систематизированного курса радиотехники не было практически и в зарубежной литературе. Поэтому Имант Георгиевич Фрейман может по праву считаться основателем радиотехники как инженерной науки. Он отмечал, что основное внимание за прошедшие после изобретения радио годы (с 1895 г.) уделялось разработке в определенной степени вспомогательных для радиотехники вопросов: созданию новых типов и конструкций генераторов незатухающих колебаний, электронных ламп. Основной же задачей радиотехники ученый считал изучение и решение задач оптимизации процессов излучения и приема электромагнитной энергии, разработку принципов построения радиосетей [18].

Выступая на торжественном заседании в мае 1925 года, посвященном 30-летию изобретения радио, Имант Георгиевич подчеркнул: «Обращаясь к работам родоначальника как нашей, так и всемирной радиотехники Александра Степановича Попова, мы не можем не признать, что одну из наиболее оригинальных деталей его изобретения составляет именно радиосеть» [19]. И. Г. Фрейман отмечает, что большая часть работ, выполненных за 30 лет, была посвящена вопросам генерирования колебаний высокой частоты. Эта, с принципиальной точки зрения, «вспомогательная техническая задача» поглотила почти все внимание исследователей. Задачи же излучения энергии, задачи изучения центрального органа радиостанции — радиосети остались «как-то в тени». «Было бы естественно ожидать, — писал И. Г. Фрейман в статье «Об эволюции радиосети», — что работы радиотехников, самым своим существованием обязанных проникновению в этот специальный круг явлений, будут почти на все сто процентов посвящены его изучению и его систематическому освещению. На самом деле ничего подобного. Не более пяти процентов всех научно-технических работ по радиотехнике и еще меньший процент патентных заявок и вообще изобретений касаются так называемого явления электромагнитного излучения» [20].

Для работ И. Г. Фреймана в области антенн характерно то, что, рассматривая какую-либо задачу, он дает не только теоретический анализ, но и методику инженерного расчета, а также анализ способов экспериментального определения соответствующих параметров. Теоретические результаты подтверждались большим количеством экспериментальных исследований, проводившихся на кораблях в реальных условиях работы радиостанций. Уже ко времени выхода в свет первого издания «Курса» произошли «совершенно исключительные изменения как в технических приемах радиотехники, так и в тех задачах, которые она призвана решать». Стали ясны преимущества ламповых методов генерирования незатухаю-

щих колебаний. Поэтому для второго издания «Курса радиотехники» (1928 г.) заново была написана глава о ламповых генераторах, в которой излагался способ расчета лампового генератора.

Во втором издании «Курса радиотехники», исправленном и дополненном, Имант Георгиевич обобщил результаты своих теоретических работ и последние достижения мировой радиотехнической науки. «Последние немногие годы, — писал Имант Георгиевич, — произвели совершенно исключительные изменения как в технических приемах радиотехники, так и в тех задачах, которые она призвана разрешать. Поэтому вопрос о переиздании моего курса, поднятый Государственным издательством в середине 1927 года, поставил меня перед задачей почти полной его переработки».

Он писал: «Я стремился выдвинуть на первый план такие количественные соотношения между рассматриваемыми в радиотехнике явлениями, которые позволили бы произвести законченный технический расчет работы радиостанции. В этом я разошелся с установившейся традицией составления курсов радиотехники, которая состояла в том, чтобы осветить преимущественно физическую сторону процессов, имеющих место при радиопередаче. При освещении физической картины количественная сторона отступает обыкновенно на задний план; в технических же расчетах важна достаточная точность определенного количественного результата, полученного хотя бы путем рассмотрения некоторого фиктивного процесса, эквивалентного в отношении искомых величин тем процессам, которые происходят в действительности» [4, с.3]. Особую признательность Имант Георгиевич выражает проф. Л. И. Мандельштаму, советами которого он «воспользовался в наибольшей мере». [4, с. 4].

О содержании и ценности изложенного в книге материала лаконично и очень информативно было сказано в рецензии проф. Д. А. Рожанского (с 1933 г. члена-корреспондента АН СССР), которая была опубликована в начале 1929 г., уже после кончины И. Г. Фреймана [19]. Он писал: «Только редкий и исключительный талант мог создать произведение, которое должно быть настольной книгой всякого радиоспециалиста. Таковой, несомненно, будет новое издание курса радиотехники проф. И. Г. Фреймана. Богатство материала, охватывающего все области современной радиотехники, свежесть сведений, которые обнаруживают перед нами упорную работу самого автора в наиболее важных вопросах этой молодой науки, исключительная эрудиция, которая совмещает знакомство с задачами, как теоретическими, так и узкопрактическими, по необходимости для радиоинженера, все это вместе делает курс И. Г. исключительным явлением нашей технической литературы. С самого начала, после блестя-

щего теоретического введения, автор в первой главе вводит читателя в гущу вопросов, имеющих основное значение для радиотехники. Свойства элементов контура, расчет лампового генератора и других источников высокой частоты, — все это получило прекрасное теоретическое освещение, но при этом везде приняты во внимание задачи технического расчета. Мы видим полную картину генерирующего устройства, его элементов и условий его работы, не перегруженную математическими формулами или вариантами схем. Эта глава является не только одной из лучших в курсе, но прямо образцовой и выдающейся по мастерству изложения. Не останавливаясь на главе об источниках энергии и трансформации колебаний, содержащей много интересного материала по выпрямительным устройствам и возбуждению колебаний в связанных цепях, мы особо отметим главу четвертую, касающуюся вопросов о стабилизации колебаний и модулировании их. По первому вопросу до сих пор нет связного и полного изложения, и поэтому тот основной материал, который мы находим в курсе И. Г., может служить основанием для дальнейшего развития идей, интересовавших его в последние годы его деятельности и приобретающих основное значение в технике высокой частоты... Гораздо больше времени автор уделяет вопросам расчета радиосети, которыми он сам много занимался в свое время. Эта одна из глав (глава 5), в которой математический материал (иногда может быть излишне громоздкий) играет видную роль. Наибольший интерес представляет в ней § 6, в котором в простой и доступной форме излагаются явления, связанные с излучением радиосети, в том числе излучение на гармониках и в сложных антеннах. В следующей главе мы находим много совсем свежего материала по распространению волн. Кроме прекрасного изложения теории влияния проводимости сферы на распространение волн, автор дает изложение учения о распространении коротких волн с теоретической и опытной стороны. Последние главы посвящены приему и анализу элементов приемных устройств. Все основные вопросы, которые могут интересовать практического инженера, здесь затронуты, но в этой области, как замечает сам автор в предисловии, не пришлось время дать полную количественную теорию, и приходится довольствоваться изложением, допускающим скорее качественные, чем количественные заключения. Эту рецензию приходится писать, когда автора уже нет среди нас и чувство безвременной утраты одного из талантливейших представителей русской радиотехники еще не потеряло своей остроты. Перелистывая страницы его книги, этого основного труда его жизни, в который он сумел вложить свои обширные знания, свой опыт и умение использовать его для решения насущной задачи, можно с уверенностью утверждать, что это духовное наследие будет долго питать новые поколе-

ния радиоинженеров и сохранит память о профессоре Фреймане и среди тех, кто уже не мог испытать на себе влияния его личного обаяния и таланта». Список литературы 2-го издания включает 26 наименований книг, изданных в Париже, Лондоне, Берлине, Лейпциге, Нью-Йорке. Эти книги по своему содержанию или изложению могли служить дополнением к «Курсу» и были полезны при более подробном изучении отдельных затронутых в нем вопросов.

«Курс радиотехники» и научные статьи Иманта Георгиевича содержат оригинальные трактовки ряда вопросов теории. Результаты теоретических и практических исследований, направленных на изучение свойств электронной лампы, были обобщены в соответствующих разделах «Курса радиотехники» (1928 г.).

Многие положения в радиотехнике, впервые сформулированные И. Г. Фрейманом, стали общеизвестными, классическими, постоянно излагаемыми на лекциях, они естественно вошли в книги, написанные его учениками. Проф. С. И. Зилитинкевич отмечал, что «“Курс радиотехники”, изданный дважды, опередил многие иностранные книги своим строго выдержанным научно-инженерным подходом... Для создания этого труда необходимо было всестороннее знакомство с литературой по радиотехнике и электротехнике, а также солидное знакомство с математикой и физикой и, наконец, умение объективно и правильно подходить к оценке всего существующего громадного материала исследований. Эта задача удалась ему вполне, и школа его учеников, им созданная, училась по этим лекциям, а весь остальной радиотехнический мир пользуется курсом, как необходимой настольной книгой» [22]. Многие работы И. Г. Фреймана на много лет опередили соответствующие иностранные, в частности, американские статьи, появившиеся в периодической литературе лишь в 1930-х годах.

«Курс радиотехники» в течение многих лет был настольной книгой каждого радиоспециалиста и во многих отношениях не утратил интереса и теперь. Заложенные в нем идеи получили дальнейшее развитие в трудах многих учеников и последователей И. Г. Фреймана (А. Н. Щукина, М. С. Неймана, В. И. Сифорова, Б. П. Асеева, А. Л. Минца и др.).

Над развитием теории построения радиоаппаратуры Имант Георгиевич работал до последних дней жизни. Его ученик, член-корреспондент АН СССР С. Я. Соколов, выступая в 1954 г. на заседании Ученого совета ЛЭТИ, посвященном памяти И. Г. Фреймана, вспоминал: «Впоследствии я очень часто бывал у Иманта Георгиевича, и видел, как много он работал над собой. Поражала его неутомимая энергия. Он курс читал великолепно. Та книга, по которой он читал курс («Курс радиотехники, 1928 — Л. 3.), к концу года вся была переложена отдельными, исписанными листами, что уве-

личивало ее объем в 2 раза. Таким образом, курс лекций превосходил материал, изложенный в книге. Даже стоял вопрос об издании этой книги в Англии. Не знаю, была ли она издана» [23]. Книга издана не была, все научные материалы, все результаты научных исследований, весь «письменный стол» Иманта Георгиевича были переданы его вдовой Н. Н. Фрейман А. И. Бергу (1893—1979), ассистенту с 1926 года профессора И. Г. Фреймана по кафедре «Специальный курс радиотехники», его ученику по Военно-Морской академии (выпуск 1925 г.). В 1930 году он защитил диссертацию и получил должность профессора по кафедре «Специальный курс радиотехники» ЛЭТИ, а в 1932 году вышла из печати книга А. И. Берга «Теория и расчет ламповых генераторов», переизданная в 1935 году, в которой в списке рекомендуемой литературы «Курса радиотехники» И. Г. Фреймана не было. В 1937 году была опубликована последняя научная работа А. И. Берга в области радиотехники, тематика которой, кстати, упоминается и в рецензии Д. А. Рожанского на «Курс радиотехники».

В книге воспоминаний известного радиоспециалиста проф. З. И. Моделя можно прочесть достаточно «любопытный» отзыв об А. И. Берге: «К некоторым работам А. И. Берга я, как и мои коллеги по работе, относился критически, считая, что они объясняются его оторванностью от практики. Но позднее я понял, что А. И. Берг, руководивший вооружениями ВМФ, обладает глубокими познаниями в обширной области, о которой я с моими товарищами не имеем никакого представления. Его, может быть, недостаточная осведомленность о практической радиотехнике компенсируется глубокими знаниями в совершенно неизвестной нам области. В результате его суммарный научно-технический потенциал гораздо выше нашего!» [24]. Цитата примечательна своей недосказанностью.

К сожалению, во многих печатных изданиях именно А. И. Бергу (члену-корреспонденту АН СССР с 1943 г., академику АН СССР с 1946 г.) приписывается «большой вклад в развитие отечественной радиоэлектроники».

3. Морские силы ставят задачу...

Для определения научно-обоснованной линии развития вооружения в 1923 году был создан Научно-технический комитет Морских Сил (НТКМС). Перед Комитетом стояли задачи разработки вопросов и предложений, касавшихся теории и практики военно-морского дела и техники: рассмотрение новых изобретений и предложений; руководство исследованиями в данной области; разработка основных технических заданий для составления проектов новых кораблей для военного флота и их боевого во-

оружения, ознакомление с состоянием науки и военно-морской техники за границей; организация проверки и испытания радиооборудования [2].

Учитывая глубокие знания в области радиотехники, понимание проблем радиотехнического вооружения флота, 3 апреля 1924 года И. Г. Фреймана, мобилизованного в 1919 году в ряды РККФ на должность радиотелеграфного приемщика, назначают председателем только что организованной секции связи и навигации научно-технического комитета Морских сил Рабоче-крестьянской Красной Армии (МС РККА). И уже в январе 1925 года на заседании секции обсуждается вопрос об основных требованиях к будущей системе радиовооружения флота. «Перспективы, которые открываются при полном использовании новых достижений радиотехники — более, чем заманчивы...» Обосновав требования к аппаратуре, которые должен предъявлять флот, Имант Георгиевич заканчивает свой доклад словами: «Таким образом, цель, к которой мы должны всеми силами стремиться при радиотехническом перевооружении и которая при современном состоянии этой отрасли техники вполне достижима — это автоматический радиообмен» [7, с. 32]. (Кстати, эта задача была решена для систем радиосвязи ВМФ только в середине 1970-х годов!).

Важнейшей заслугой И. Г. Фреймана было доказательство перспективности применения электронных ламп не только в радиоприемных устройствах, но и в радиопередатчиках. Переход от электромашинных методов генерирования электромагнитных волн к применению ламповых генераторов был очень болезненным, вызывал ожесточенные споры, вплоть до сообщений в органы о некомпетентности ученых, «защищавших электронную лампу». О перспективах применения электронной лампы в беспроводной радиотелефонии И. Г. Фрейман писал уже в самых первых своих публикациях. Приведенная выдержка из доклада свидетельствует о том, что уже к 1925 году у И. Г. Фреймана была продуманная концепция построения принципиально новой системы радиовооружения флота. Но при этом вставала проблема эффективного использования новых систем вооружения. Поэтому И. Г. Фрейман много внимания и сил уделял организации службы наблюдения и связи, а также вопросам подготовки специалистов. Рождение службы наблюдения и связи как самостоятельного органа происходило в очень трудных условиях.

Целенаправленно занимаясь проблемами создания средств связи и наблюдения для Флота и постоянно расширяя тематику исследований, И. Г. Фрейман привлек в 1924 году сотрудников ЛЭТИ Б. П. Козырева и С. И. Панфилова к экспериментальным работам по распространению инфракрасных лучей в атмосфере. В 1926 году А. А. Шапошников и Б. П. Козырев приступили к созданию пробной модели пьезокварцевого

гидрофона. [7, с. 34]. 25 февраля 1925 года в помещении Опытного судостроительного морского бассейна были проведены успешные испытания макета гидрофона. Весной 1925 года на Пленуме НТК МС по инициативе секции связи НТК было принято решение об организации полигона для поведения испытаний радиоаппаратуры.

С 1926 года И. Г. Фрейман совмещал руководство секцией связи с деятельностью в Государственном электротехническом тресте заводов слабого тока (ЭТЗСТ), который был исполнителем заказа на новую радиоаппаратуру. Среди первоочередных вопросов, над которыми работали И. Г. Фрейман и флагманский связист штаба КБФ, военный инженер 1-го ранга, его ученик по ВМА А. Н. Гриненко-Иванов (1900—1938), была разработка ТЗ на ламповую систему радиосвязи для флота, обеспечение связи с погруженными подводными лодками, разработка предложений по улучшению характеристик антенн для радиосвязи с кораблями, повышение помехоустойчивости связи с самолетами морской авиации.

В 1927 году Научно-техническим комитетом УВМС РККА были разработаны теоретические положения о задачах, стоящих перед Балтийским флотом. Работа называлась «Рассуждения о Балтфлоте». О ней знали лишь немногие. Это было руководство к действию, составленное из отдельных глав по каждой секции. В этом документе была отражена позиция Комитета по вопросам строительства и развития Флота, на нем стоял гриф «совершенно секретно». Сюда вошли и работы И. Г. Фреймана, которые представляли собой научно обоснованные записки, касающиеся радиотехнического вооружения кораблей Военно-морского флота и способы их использования.

В своих записках И. Г. Фрейман впервые затронул вопрос об электромагнитных волнах как носителе информации, отраженной от цели в результате облучения. Но сделать соответствующую аппаратуру, создать радиоустройства слежения за целью в то время было трудновыполнимой задачей [25].

Стремясь пополнить круг специалистов, занимавшихся подводной акустической аппаратурой, в 1925 году Имант Георгиевич пригласил своего ученика выпускника ЛЭТИ С. Я. Соколова (член-корр. АН СССР, 1953) для работ по созданию прибора «сверхтональной акустической волны». И. Г. Фрейман и сам проводил экспериментальные исследования с ультразвуковыми излучателями. 3 декабря 1927 года в радиолaborатории ЛЭТИ были испытаны пьезоэлектрические вибраторы с целью получения интенсивных ультразвуковых колебаний в жидкостях.

В дальнейшем, делаясь воспоминаниями о своем учителе И. Г. Фреймане, С. Я. Соколов подчеркивал, что заслуга самой постановки работ в

области акустики в интересах Военно-Морского Флота принадлежит Фрейману, вопрос о связи между подводными лодками также был поставлен им [7, с. 34]. По предложению А. И. Берга, являвшегося с 1927 по 1932 годы председателем секции связи НТК МС (он сменил в 1927 году на этом посту И. Г. Фреймана, сосредоточившего свои силы на работе в промышленности в качестве консультанта Центральной радиолаборатории ЭТЗСТ), все научно-исследовательские работы по гидроакустике в ЛЭТИ были свернуты, и было решено закупать гидроакустическую аппаратуру в Германии [26].

25—27 мая 1927 года на пленуме НТК МС был заслушан доклад И. Г. Фреймана «Проблемы связи военного флота». В принятом по докладу постановлении НТК МС РККА излагались основные тактико-технические требования к радиопередатчикам и радиоприемникам, составленные по свидетельству инженеров, работавших над разработкой этой аппаратуры на предприятиях ЭТЗСТ, лично Имантом Георгиевичем. Указанным постановлением было положено начало созданию новой системы радиовооружения Флота, известной под названием «Блокада-1».

Начальник Военно-морской академии проф. Б. Б. Жерве, оценивая вклад Фреймана в развитие средств связи ВМФ, писал в 1929 г.: «Морские Силы РККА привыкли видеть на своих кораблях во время практических плаваний и маневров Иманта Георгиевича, внимательно исследующего на практическом опыте вопросы радиосвязи, и эти его исследования не ограничивались теоретическими рамками. Последние достижения в технике и организации связи на Морских Силах долгое время еще будут свидетельствовать о знаниях, энергии и трудах профессора И. Г. Фреймана» [27].

3. Заключение

Радиотехника как область знаний и практической деятельности человека за сто с лишним лет своего развития прошла огромный путь — от первой системы беспроводной передачи сигналов до современных радиоэлектронных систем и космических радиосистем. Научно-исследовательская и педагогическая деятельность профессора И. Г. Фреймана, включавшая и активную экспериментальную работу, дает основание определить его роль в истории радиотехники как основателя научно-инженерной школы радиотехники в России. «Счастлирое сочетание теоретика, владеющего могущественным оружием математического анализа, и инженера-практика, все время работавшего над задачами промышленной радиотехники, определили лидирующее в те годы положение профессора И. Г. Фреймана в отечественной радиотехнике» [28]. Сложная и напря-

женная обстановка в стране в 30-х годах, ограниченность информации о репрессированных людях, сыграла свою отрицательную роль в сохранении памяти об И. Г. Фреймане. Он ушел из жизни совсем молодым (в возрасте 38 лет), но, тем не менее, как уже признанный лидер ленинградской школы радиотехники. Но в 1930 году был репрессирован его ближайший учитель и коллега проф. Н. А. Скрицкий, в 1931 году по делу «Промпартии» был осужден его учитель проф. П. С. Осадчий (1866—1943), и этот момент также не способствовал сохранению памяти об ученом. В 1937—1940 гг. ушли из жизни или были расстреляны многие ученики и соратники Иманта Георгиевича. Их имена были практически забыты, и сейчас с благодарностью за вклад в развитие отечественной науки и техники реальная история восстанавливается.

Список литературы

1. Золотинкина Л. И., Партала М. А. Некоторые проблемные вопросы истории зарождения и развития радиотехники и их разработка в Мемориальном музее А. С. Попова СПбГЭТУ «ЛЭТИ» // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2019. Т. 2, № 4. С. 547—559.
2. Биккенин Р. Р. И. Г. Фрейман : научное обоснование развития военно-морской связи в период строительства флота // В кн. : Биккенин Р. Р., Глущенко А. А., Партала М. А. Очерки о связистах Российского флота / Под ред. Ю. М. Кононова. СПб, 1998. С. 254—276.
3. Фрейман И. Г. Курс радиотехники. Л. : ГИЗ, 1924. 342 с.
4. Фрейман И. Г. Курс радиотехники : 2-е изд., перераб. и доп. Л. : ГИЗ, 1928. 495 с.
5. АЦМС, ф. Радио, оп. 1, д. 932, л. 4.
6. Золотинкина Л. И., Шошков Е. Н. Имант Георгиевич Фрейман. Л. : Наука, 1989. 144 с.
7. Имант Георгиевич Фрейман Избранные труды / Сост., вступ статья Л. И. Золотинкина ; под. ред. В. Н. Ушакова. СПб. : Изд-во «Пропаганда», 2015. 340 с.
8. Фрейман И. Г. Современное состояние беспроводного телефонирования // Известия Общества инженеров-электриков. 1915. № 2. С. 32—39.
9. Фрейман И. Г. К последнему успеху радиотелефонирования // Известия Общества инженеров-электриков. 1916. № 5. С. 151—152.
10. Фрейман И. Г. Основные задачи для машин высокой частоты для радиопередачи // Телеграфия и телефония без проводов. 1921. № 19. С. 331—341.
11. Золотинкина Л. И. От «беспроволочной телеграфии» до «радиотехники». В сб. : 25-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» — КрыМиКо'2015 (Севастополь, 6—12 сент. 2015 г.). 2015. С. 54—56.
12. Фрейман И. Г. Приложение электронного реле в радиотелеграфном деле // Морской сборник. 1918. № 1. С. 109—115.
13. Фрейман И. Г. Чем определяется качество усилительной лампы // Техника связи. 1924. Т. 2, вып. 3, 4. С. 293—296.
14. Фрейман И. Г. Краткий очерк основ радиотехники. Петроград : тип. М. П. Фроловой (влад. А. Э. Коллинс), 1917. 73 с.
15. Фрейман И. Г. Патент № 787 (СССР) от 30 октября 1925г. Устройство для многократного телефонирования. Заявка от 6 авг. 1919 г.
16. АЦМС, ф. Радио, оп. 1, Ед. хр. 36, л. 6.

17. Чернышев А. А. Проф. И. Г. Фрейман. Курс радиотехники // Электричество. 1924. № 11, С. 561.
18. Фрейман И. Г. Положение вопроса о распространении электромагнитных волн // Журнал прикладной физики. 1927. Т. 4, вып. 4. С. 59—76.
19. Фрейман И. Г. Об эволюции радиосети // Электричество. 1925. № 4. С. 242—246.
20. Золотинкина Л. И. Об эволюции радиосети. В сб. : 27-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» — КрыМиКо'2017 (Севастополь, 10—16 сент. 2017 г.). 2017. С. 1832—1838.
21. Рожанский Д. А. Курс радиотехники : Фрейман И. Г. // Электричество. 1929. № 13-14. С. 384.
22. Зилитинкевич С. И. Имант Георгиевич Фрейман // Телеграфия и телефония без проводов. 1929. № 3. С. 291—294.
23. Архив Мемориального музея А. С. Попова. Ф.2.7.4. Фрейман. Вх. № 12543. Выписка из протокола заседания Ученого совета ЛЭТИ от 12 марта 1954 г.
24. Модель З. И. Воспоминания. СПб. : Изд. СПбГУТ, 1995. С. 156—157, 198.
25. Лезин А. В., Сергеев Э. А., Ященко В. В. Из истории создания отечественных флотских научно-исследовательских учреждений радиосвязи (1923—1932) // Радиоэлектроника и связь. 1991. № 2-3 (4-5). С. 50—56.
26. Справочник по гидроакустике / А. П. Евтютов и др. Л. : Судостроение, 1982. 339 с.
27. Жерве Б. Б. Имант Георгиевич Фрейман // Морской сборник. 1929. № 2. С. 3—5.
28. Циклинский Н. Н. Памяти И. Г. Фреймана // Электросвязь. 1929. № 8. С. 5—7.

Информация об авторе

Золотинкина Лариса Игоревна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, заслуженный работник культуры РФ, директор Мемориального музея А. С. Попова Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

At the Origins of Domestic Radio Electronics

L. I. Zolotinkina

Saint Petersburg Electrotechnical University (LETI)
5, Professor Popov str., Saint Petersburg, 197022, Russian Federation

Received: May 20, 2023

Peer-reviewed: May 31, 2023

Accepted: May 31, 2023

Abstract: *The first tube communication system “Blokada-1” designed for The Naval Forces of Workers’ and Peasants’ Red Fleet (MS RKKF) was among the first domestic radio-electronic systems. The scientifically grounded concept for its construction and implementation was developed by the first chairman of the Communications Section of the MS RKKF Science and Technology Committee, a professor Imant Georgievich Freiman, a head (1917–1929) of the first national department of radio engineering in Electrotechnical Institute, who continued the work A. S. Popov in all scientific and social areas. Research and teaching activities of I. G. Freiman, including active experimental work, gives grounds for determining his role in the history of radio engineering and radio electronics as the founder of the scientific and engineering school of radio engineering in Russia.*

Keywords: *radio engineering, radio physics, electron tube, radio electronics, I. G. Freiman, A. S. Popov, “Blokada-1”, electromagnetic radiation, Electrotechnical Institute n. a. V. I. Ulyanov (Lenin), MS RKKF Science and Technology Committee.*

For citation (IEEE): L. I. Zolotinkina, “At the Origins of Domestic Radio Electronics,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 6, no. 3, pp. 308–326, 2023, doi: 10.29039/2587-9936.2023.06.3.24. (In Russ.).

References

- [1] L. I. Zolotinkina and M. A. Partala, “Some problematic issues in the history of the origin and development of radio engineering and their development in the A. S. Popov Memorial Museum of St. Petersburg Electrotechnical University ‘LETI’” // *Infocommunications and radio technologies*, vol. 2, no. 4, pp. 547–559, 2019. (In Russ.).
- [2] R. R. Bikkenin, “I. G. Freiman : scientific substantiation of the development of naval communications during the construction of the fleet” in : Bikkenin R. R., Glushchenko A. A., Partala M. A. *Essays on signalmen of the Russian fleet*, ed. Yu. M. Kononov, St. Petersburg, pp. 254–276, 1998. (In Russ.).
- [3] I. G. Freiman, *Course of radio engineering*, Leningrad : GIZ, 1924. (In Russ.).
- [4] I. G. Freiman, *Course of radio engineering*, 2nd ed., Leningrad : GIZ, 1928. (In Russ.).
- [5] Archive of the Central Museum of Communications, f. Radio, op. 1, d. 932, l. 4. (In Russ.).
- [6] L. I. Zolotinkina and E. N. Shoshkov, *Imant Georgievich Freiman*, Leningrad : Nauka, 1989. (In Russ.).
- [7] *Imant Georgievich Freiman. Selected works* / Compiled, introductory article by L. I. Zolotinkina ; ed. V. N. Ushakov, SPb. : Propaganda Publishing House, 2015. (In Russ.).

- [8] I. G. Freiman, "Current state of wireless telephony," *Izvestiya Obshchestva inzhenerov-elektrikov*, no. 2, pp. 32–39, 1915. (In Russ.).
- [9] I. G. Freiman, "To the last success of radiotelephony," *Izvestiya Obshchestva inzhenerov-elektrikov*, no. 5, pp. 151–152, 1916. (In Russ.).
- [10] I. G. Freiman, "Main tasks for high-frequency machines for radio transmission," *Telegrafiya i telefoniya bez provodov*, no. 19, pp. 331–341, 1921. (In Russ.).
- [11] L. I. Zolotinkina, "From 'wireless telegraphy' to 'radio engineering'", in : 25th Intern. Crimean Conf. "Microwave and telecommunication technology" – CriMiCo '2015 (Sevastopol, September 6–12, 2015), 2015, pp. 54–56. (In Russ.).
- [12] I. G. Freiman, "Application of an electronic relay in radiotelegraph business," *Morskoy sbornik*, 1918, no. 1, pp. 109–115. (In Russ.).
- [13] I. G. Freiman, "What determines the quality of an amplifying lamp," *Tekhnika svyazi*, vol. 2, no. 3, 4, 1924, pp. 293–296. (In Russ.).
- [14] I. G. Freiman, *Briefessay on the fundamentals of radio engineering*, Petrograd : 1917. (In Russ.).
- [15] I. G. Freiman, Patent No. 787 (USSR) dated October 30, 1925. Device for repeated telephoning. Appl. dated Aug. 6, 1919. (In Russ.).
- [16] Archive of the Central Museum of Communications, f. Radio, op. 1, unit 36, l. 6. (In Russ.).
- [17] A. A. Chernyshev, "Prof. I. G. Freiman. Course of radio engineering," *Electrichestvo*, no. 11, p. 561, 1924. (In Russ.).
- [18] I. G. Freiman, "Position of the issue of propagation of electromagnetic waves," *Journal of Applied Physics*, vol. 4, no. 4, pp. 59–76, 1927. (In Russ.).
- [19] I. G. Freiman, "On the evolution of the radio network," *Electrichestvo*, no. 4, pp. 242–246, 1925. (In Russ.).
- [20] L. I. Zolotinkina, "On the evolution of a radio network," in : 27th Intern. Crimean Conf. "Microwave and telecommunication technology" – CriMiCo '2017 (Sevastopol, September 10–16, 2017), pp. 54–56, 2017. (In Russ.).
- [21] D. A. Rozhansky, "Course of radio engineering : Freiman I. G.," *Electrichestvo*, no. 13-14, p. 384, 1929. (In Russ.).
- [22] S. I. Zilitinkevich, "Imant Georgievich Freiman," *Telegrafiya i telefoniya bez provodov*, no. 3, pp. 291–294, 1929. (In Russ.).
- [23] Archive of the A. S. Popov Memorial Museum. F.2.7.4. Freiman. Inv. no. 12543, Extract from the protocol of the meeting of the Academic Council of LETI on March 12, 1954. (In Russ.).
- [24] Z. I. Model, *Memories*, SPb. : SPbGUT, pp. 156–157, 198, 1995. (In Russ.).
- [25] A. V. Lezin, E. A. Sergeev, and V. V. Yashchenko, "From the history of the creation of domestic naval research institutions of radio communication (1923–1932)," *Radioelektronika i svyaz*, no. 2-3 (4-5), pp. 50–56, 1991. (In Russ.).
- [26] A. P. Evtyutov et al. *Reference book on hydroacoustics*, Leningrad : Sudostroyenie, 1982. (In Russ.).
- [27] B. B. Zherve, "Imant Georgievich Freiman," *Morskoy Sbornik*, no. 2, pp. 3–5, 1929. (In Russ.).
- [28] N. N. Tsiklinskii, "In memory of I. G. Freiman," *Elektrosvyaz*, no. 8, pp. 5–7, 1929. (In Russ.).

Information about the author

Larisa I. Zolotinkina, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Honored Worker of Culture of the Russian Federation, Director of the A. S. Popov Memorial Museum of St. Petersburg State Electrotechnical University "LETI", St. Petersburg, Russian Federation.

УДК 621.37-621.39(091)

Успех бизнес-плана компании AT&T

Пестриков В. М.

*Санкт-Петербургский государственный институт кино и телевидения
ул. Правды, 13, Санкт-Петербург, 191119, Российская Федерация
pvm205@yandex.ru*

Получено: 19 марта 2023 г.

Отрецензировано: 30 марта 2023 г.

Принято к публикации: 20 мая 2023 г.

Аннотация: Показано, что покупка AT&T в 1912 году у Ли де Фореста патентных прав на его аудион сделала реальностью осуществление проекта трансконтинентальной телефонной линии Нью-Йорк — Сан Франциско. Рассмотрены особенности строительства этой телефонной линии и возникшие при этом трудности. Уделено внимание разработке электрических схем и конструкций ламповых трансляторов, а также их установке на телефонной линии. Проанализированы принципы работы ламповых трансляторов типа 21 и 22. Приводятся результаты первого тестирования линии 29 июля 1914 года. Отмечен памятный день 25 января 1915 года — день торжественного запуска в коммерческую эксплуатацию трансконтинентальной телефонной линии за 25 дней до открытия Панамо-Тихоокеанской международной выставки в Сан Франциско.

Ключевые слова: Ли де Форест, трансконтинентальная телефонная линия Нью-Йорк — Сан Франциско, ламповый транслятор, транслятор типа 21, транслятор типа 22, Панамо-Тихоокеанская международная выставка в Сан Франциско, Элис Фэй.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Пестриков В. М. Успех бизнес-плана компании AT&T // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2023. Т. 6, № 3. С. 327—355.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Пестриков, В. М. Успех бизнес-плана компании AT&T / В. М. Пестриков // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2023. — Т. 6, № 3. — С. 327—355.

1. Введение

К 1911 году телефонная связь достигла практического предела 2100 миль между Нью-Йорком и Денвером. Звук неусиленного голоса из Нью-

Йорка был слышен очень слабо в Денвере¹ (*Denver*, штат Юта). Денвер был пределом для больших расстояний. До этого предела можно было использовать механические трансляторы с нагрузочными катушками Пупина и передавать голос без еще не появившегося к тому времени усилителя электрических сигналов. Еще в 1909 году AT&T инициировала проект по расширению линии от Денвера до Калифорнии с целью создать полную трансконтинентальную линию. Решение этой географической проблемы было тесно связано с ее технической составляющей. Сокращение расстояний требовало репитера или повторителя², активного устройства, которое бы добавляло энергию к сигналу, в отличие от пассивных нагрузочных катушек, которые просто сдерживали его затухание.

Создание электронных усилителей для трансконтинентальной телефонной связи стало реальностью после покупки AT&T в 1913 году у Ли де Фореста патентных прав на его аудион. Трансконтинентальное обслуживание оставалось недоступным до тех пор, пока инженеры компании *Bell* не начали экспериментировать с триодной электронной лампой. Обнадеживающие результаты экспериментов Гарольда Арнольда позволили AT&T в 1912 году начать строительство телефонной линии³ к востоку от Сакраменто⁴ (*Sacramento*). К 1913 году AT&T провела испытания высоковакуумных ламп в сети дальней связи. Изготовление Гарольдом Арнольдом первого телефонного транслятора на вакуумном триоде послужило сигналом к ускорению строительства трансконтинентальной телефонной линии. Осенью 1913 года началось строительство линии от Денвера почти строго на север до Шайенна⁵ (*Cheyenne*) в штате Вайоминг, откуда она уходила в западном направлении в Солт-Лейк-Сити (*Salt Lake City*). Это было связано с желанием проложить линию связи к отдаленным городам. Строительство телефонных линий шло навстречу друг другу, из городов Денвера и Сакраменто.

¹ Денвер — крупнейший город и столица штата Колорадо (*Colorado*). Денвер расположен в центральной части США между Скалистыми горами (*Rocky Mountains*) на западе и Великими равнинами (*High Plains*) на востоке.

² В области современной коммуникации под повторителем понимают электронное устройство, которое получает сигнал и ретранслирует его. По-существу «повторитель» — это перевод с английского «*repeater*». В отечественной технической литературе можно встретить вместо «повторителя» английское написание по-русски «репитер». В БСЭ 2 изд. Т. 42 на с. 177 приводится описание термина «телефонная трансляция» — промежуточный усилительный пункт, устанавливаемый на линии телефонной связи для увеличения дальности передачи.

³ Transcontinental Telephone Line.

URL: <https://jacobbarlow.com/?s=Transcontinental+Telephone+Line&search=Go> (22.02.2023).

⁴ Сакраменто — столица американского штата Калифорния, расположенная на месте впадения реки Американ-Ривер в реку Сакраменто.

⁵ Шайенн — город на северо-западе США, административный центр и крупнейший город штата Вайоминг (*Wyoming*).

2. Трансконтинентальная телефонная линия

На национальном уровне телефонные провода связывали США подобно тому, как это сделали телеграф и железные дороги в 1860-х годах. Прокладка телефонной линии между Солт-Лейк-Сити и Вендовером⁶ вызывала много проблем. Временами рабочая температура на воздухе достигала 55°C, а яркий свет делал работу в дневное время практически невозможной. Преодолевая болота, чтобы найти лучший маршрут для столбов, инженеры часто глубоко проваливались, и их приходилось вытаскивать из болота на веревках. По ночам их сон часто нарушался рычанием диких зверей, которые рыскали вокруг стана. На великих равнинах были замечены стаи диких лошадей. Иногда самые смелые из отряда бросались в погоню, потому что по закону страны эти лошади являются собственностью любого, кто сможет их поймать и приручить. На больших высотах Скалистых гор снег и лед доставляли геодезистам проблемы и делали их работу чрезвычайно тяжелой.

17 июня 1914 года AT&T, невзирая на трудности прокладки линии, установила последний (рис. 1) из примерно 130 000 столбов в Вендовере. Интервал между столбами, как правило, составлял около 135 футов (41 м). Провода были сращены, соединив более 3400 миль телефонной линии.

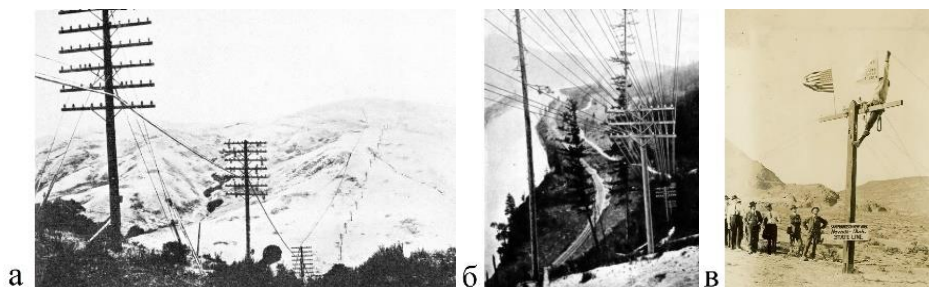


Рис. 1. Телефонная линия в горах между Сан-Франциско (а) и Сакраменто (б) в Калифорнии; крутизна склонов представляла серьезные проблемы при ее прокладке. Установка последнего столба (в) 17 июня 1914 г. на первой трансконтинентальной телефонной линии в районе Вендовера, Юта.

Fig. 1. A telephone line in the mountains between San Francisco (a) and Sacramento (b) in California, the steepness of the slopes presented serious problems when laying it. Installing the last pole (в) on June 17, 1914 on the first transcontinental telephone line in the Wendover, Utah area

⁶ Вендовер (Wendover) — небольшой городок на западной окраине округа Туэлле, штат Юта, США. Основан в 1908 году как станция на Западно-Тихоокеанской железной дороге. Находится в 180 км западнее города Солт-Лейк-Сити и 853 км от города Сакраменто. Армия США использует район недалеко от города Вендовер в качестве дополнительного полигона для бомбардировок.

Большая часть телефонной линии Нью-Йорк — Сан-Франциско была построена из медного провода № 8 (*BWG*, диаметр около 0,164 дюйма, или 4,2 мм), весом 870 фунтов на петлевую милю⁷. Масса меди в линии составила 2500 тонн. Деревянные столбы удерживали средства передачи телефонного сигнала — четыре медных провода, которые обеспечивали две физические цепи и одну фантомную. Одна физическая цепь или пара проводов служила передающим проводником, а другая пара — обратным проводником фантомной цепи. Кроме того, для каждой физической схемы требовалось 13600 миль изолированного провода диаметром 0,032 дюйма (0,8 мм) для нагрузочных катушек. Катушки, располагались на расстоянии около 8 миль (13 км) друг от друга и состояли из железных колец, изготовленных из тонкой железной проволоки, поверх которой было намотано большое количество витков изолированной медной проволоки. Целью этих катушек было предотвратить искажение тока, которое в то время было большим недостатком междугородной телефонной связи.

Линия пересекала 13 штатов. В результате на границе Невады и Юты в Вендовере была построена первая трансконтинентальная телефонная линия. Здесь встретились строительные силы телефонной компании Белл из Невады (*Bell Telephone Company of Nevada*) и телефонной и телеграфной компании горных штатов (*Mountain States Telephone and Telegraph Company*), которые впервые соединили проводами голосовой связи Восток и Запад.

Эксперименты показали⁸, что голосу требуется всего пятнадцатая доля секунды, чтобы пройти весь путь от Нью-Йорка до Сан-Франциско. Это соответствует скорости более 50 000 миль в секунду (80467,2 км/с).

По информации *AT&T*⁹ с востока на запад линия протянулась на 390 миль от Нью-Йорка до Питтсбурга, на 545 миль до Чикаго, на 500 миль до Омахи, на 585 миль до Денвера, на 580 миль до Солт-Лейк-Сити и на 770 миль до Сан-Франциско — в общей сложности длина проложенной телефонной линии составила более 3400 миль (5471,77 км), рис. 2. Провода первой сверхдлинной линии соединили два побережья США — восточное с западным.

Завершение строительства первой трансконтинентальной телефонной линии прошло без особой помпы. Был сделан последний стык, установлены флажки на поперечных столбах и сделаны фотографии. К январю

⁷ Петлевая миля — длина провода в милях в двухпроводной линии.

⁸ The First Transcontinental Telephone Line. Wonders of World Engineering.

URL: https://www.wondersofworldengineering.com/transcontinental_telephone_line.html (26.02.2023).

⁹ Baig Edward C. AT&T celebrates coast-to-coast call centennial. USA TODAY.

URL: <https://www.usatoday.com/story/tech/2015/01/23/att-celebrates-coast-to-coast-call-centennial-milestone/22232319/> (19.02.2023).

1915 года города Нью-Йорк и Сан-Франциско были соединены в основном воздушными телефонными проводами. Только в городах линии были проложены под землей. При прокладке проводов было обнаружено, что не на всех подземных участках телефонной линии возможна телефонная связь. На линии было установлено три двухполосных транслятора типа 22 на электронных лампах.

Продолжение линии от Денвера до Сан-Франциско было проложено самым тщательным образом. Помимо этого было проведено детальное электрическое обследование всей линии от Атлантики до Тихого океана. Каждый фут линии был электрически протестирован и измерен. Это позволило разместить нагрузочные катушки на наиболее приемлемых участках для обеспечения идеального баланса по всей линии.

Прокладка линии телефонных проводов, соединивших Нью-Йорк и Сан-Франциско, стала кульминацией 30-летней работы AT&T. Строительство сети началось в Нью-Йорке в 1885 году и быстро добралось до Чикаго в 1892 году. Однако из-за депрессии 1893—1897 годов и отсутствия адекватной технологии для передачи электрических сигналов на сверхдлинные расстояния телефонная линия достигла Денвера только в 1911 году.



Рис. 2. На карте отмечены города США, которые связала трансконтинентальная телефонная линия связи в 1915 г. На карте показаны места установки первых трех телефонных ламповых трансляторов (январь 1915 г.). Трасса трансконтинентальной телефонной линии через соленое озеро Гумбольдта на северо-западе штата Невада (1700 миль от Сакраменто).

Fig. 2. The map shows US cities that were connected by a transcontinental telephone line in 1915. The map shows the installation sites of the first 3 telephone tube repeaters (January 1915). The route of a transcontinental telephone line through Humboldt salt Lake in northwestern Nevada (1700 miles from Sacramento)

Компания AT&T подготовила к эксплуатации первую трансконтинентальную телефонную линию 27 июня 1914 года, когда на последнем телефонном узле связи были установлены и приняты к работе трансляторы в городе Вендовере. Однако первый трансконтинентальный звонок не был сделан, так как компания решила подождать и сделать столь важный звонок перед открытием Панама-Тихоокеанской международной выставки в Сан-Франциско.

Первое подключение всей телефонной линии в тестовом режиме было осуществлено 17 июня 1914 года. После этого по результатам тестирования в течение 6 месяцев проходило устранение выявленных изъянов, прежде чем началось ее эксплуатация.

Первое испытание трансконтинентальной телефонной линии в режиме голосовой связи состоялось в среду 29 июля 1914 года. В этот день президент AT&T Теодор Вейл говорил с Атлантического побережья с инженерами, находившимися на берегу Тихого океана. Его голос был усилен по телефонной линии всего тремя трансляторами: в Питтсбурге (*Pittsburgh*, штат Пенсильвания), Омаха (*Omaha*, штат Небраска) и Солт-Лейк-Сити (штат Юта). Интересно отметить, что днем раньше, 28 июля 1914 года, началась Первая мировая война — Австро-Венгрия объявила войну Сербии.

3. Особенности электрических схем ламповых трансляторов

Разработка телефонного транслятора сама по себе представляла собой целое искусство — для его создания потребовалась работа большого числа ученых, изобретателей, инженеров и специалистов по производству, а также квалифицированных специалистов по техническому обслуживанию и эксплуатации, чтобы использовать его наиболее эффективным образом. Телефонный транслятор ни в коем случае не являлся устройством, которое было или могло быть изобретено отдельным человеком, работавшим в одиночестве.

В линиях связи большой дальности потери настолько велики, что удовлетворительная работа становится невозможной без использования усиления. Назначение телефонного транслятора состоит в том, чтобы усилить слабое телефонное сообщение после того, как оно прошло определенное расстояние по линейным проводам или по кабелю. При этом энергия сигнала настолько уменьшается, что, если бы он не был усилен, то результатом на другом конце линии была бы слабая и неудовлетворительная передача сообщения. До изобретения телефонного транслятора задача передачи телефонной речи на большие расстояния была аналогична задаче выстрела ядра из пушки на большое расстояние и получения для этого всего необходимого импульса с самого начала. С помощью телефонного транслятора можно послать сообщение на определенное расстояние, а затем дать ему еще один толчок, и еще один толчок, чтобы, наконец, довести его до адресата.

Большая часть схем усиления является односторонними, то есть они передают и усиливают токи только в одном направлении. Для большинства целей достаточно односторонних цепей, но для усиления токов в телефонных линиях усилитель должен быть способен передавать и усили-

вать токи в обоих направлениях, чтобы можно было вести двусторонние разговоры по линии. На самом деле, двусторонняя работа является существенной чертой телефонной связи, которая должна быть обеспечена некоторыми дополнительными элементами. Это не характеристика самого элемента, а характеристика схемы, в которой этот элемент используется.

До 1912 года единственным типом используемой схемы транслятора был так называемый «тип 21», в котором один элемент транслятора усиливает сообщения, поступающие к нему с обоих направлений. При этом необходимо, чтобы два связанных участка линии имели близкие характеристики. Хорошо известным ограничением транслятора 21-го типа является его склонность «петь», когда дисбаланс линии или усиление превышает определенные довольно низкие пределы.

На рис. 3а показана одна из простейших схем двусторонней схемы на лампе, так называемый «тип 21» [1]. Ламповый телефонный транслятор типа 21 состоит из двух частей: лампового усилителя и связанной с ним схемы и оборудования. В трансляторах, используемых для цепей речевой частоты, используют обычно вакуумные триоды. На рис. 3б приведена схема для двусторонней передачи сигнала с одним транслятором на вакуумном триоде [1, р. 1324]. Эта схема известна как «схема транслятора 21-го типа» (двусторонняя схема с одним транслятором). В этом трансляторе двусторонняя передача в 21-контурной катушке осуществляется за счет балансировки двух линий непосредственно друг относительно друга. Таким образом, если импеданс справа (*Line East*) равен импедансу слева (*Line West*), то потенциалы точек подключения не зависят от усиленного выходного тока. Если импедансы этих линий не равны, то усиленный ток на выходе вызовет повышение электрического потенциала на сетке усилителя. Это вызовет дальнейшее усиление, причем усиление происходит по нарастающей, что создаст устойчивые колебания или «пение».

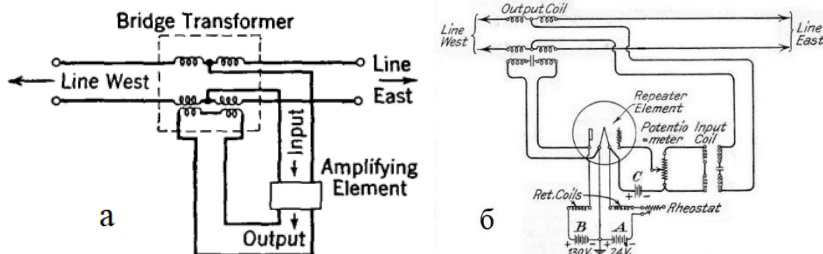


Рис. 3. Простой двухсторонний транслятор (а) с использованием гибридной катушки. Принципиальная схема телефонного транслятора типа 21 (б) с усилителем на вакуумном триоде.

Fig. 3. A simple two-way repeater (a) using a hybrid coil. Schematic diagram of a type 21 telephone repeater with a vacuum triode amplifier

Транслятор типа 21 очень прост в эксплуатации, требует небольшого количества оборудования, относительно дешев в установке и эксплуатации, но ограничен в применении. Чтобы предотвратить колебания или «пение», импеданс линии слева (*Line West*) должен быть равен импедансу линии справа (*Line East*). Но поскольку эти отношения как правило не поддерживаются, то выходная и входная цепи будут связаны. Транслятор 21-го типа посылает усиленную энергию в обоих направлениях. Этот транслятор не подходит для работы в тандеме (несколько трансляторов, установленных в разных точках одной линии), поскольку энергия, текущая обратно к громкоговорителю (и к слушателю), будет повторно усилена и повторно введена в обоих направлениях на линии в каждой точке транслятора, что вызовет надоедливое эхо. Другими словами, если одна линия по своим электрическим характеристикам отличается от другой, то, несмотря на равенство двух частей катушки, будет неравное деление тока и возникнет «пение».

4. Ламповый транслятор типа 22

Транслятор 22-го типа, с другой стороны, имеет два усилительных элемента и две искусственные линии, по одной для балансировки каждого связанного участка реальной линии. Хотя основная идея 22-типа была старой, Кэмпбеллу удалось отразить в служебной записке от 7 марта 1912 г. присущие ему свойства стабильности [2]: «...использование компенсирующего устройства, такого как искусственная линия, для уменьшения усиления на резонансных частотах до уровня усиления на других телефонных частотах, в целом предполагают идею выравнивания амплитудно-частотных искажений. Искажения вносятся селективными характеристиками линейных цепей или другим оборудованием в длинной системе... Если бы потребовалось просто исключить некоторые частоты, лежащие за пределами диапазона, необходимого для телефонии, то использование схемы искусственного выбора является определенной предпосылкой для их применения». Во всех трансляторах впоследствии получили распространение фильтры нижних частот для отсеки частоты за пределами передаваемого диапазона и, таким образом, удалось свести к минимуму трудности балансировки линии.

Проблема баланса оказалась одной из самых трудных при разработке телефонного транслятора. Вопросу об изучении баланса или методах его достижения в лаборатории Г. Арнольда было посвящено столько же исследований, сколько и любому другому аспекту проблемы телефонного транслятора.

На рис. 4а показан один из способов получения двухсторонней трансляционной связи [1, р. 1326]. Используются два усилителя, по одному для каждого направления передачи. Обратная связь и колебания предотвращаются гибридными катушками, которые являются по существу трехобмоточными трансформаторами сбалансированной конструкции. Сигнал, идущий с запада на восток, встречает первую гибридную катушку, где часть мощности поступает в запад-восточный усилитель посредством центральных отводов от основных витков катушек. На основе этого способа была разработана схема транслятора типа 22 (двухполосная, с двумя трансляторами), рис. 4б [1, р. 1326—1330].

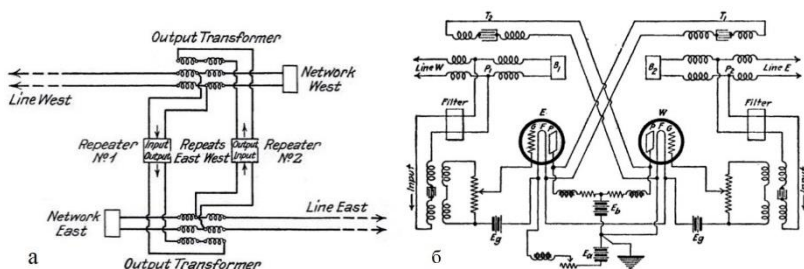


Рис. 4. Схемы двухсторонних трансляторов: а — блок схема,
 б — принципиальная схема транслятора типа 22 на ламповых триодах.

Fig. 4. Schemes of two-way repeaters: a – block diagram,
 b – circuit diagram of a type 22 repeater on tube triodes

Преимущества 22-контурной схемы по сравнению с 21-контурной очевидны: последняя требует, чтобы импедансы линий, ведущих к двум телефонным подстанциям, между которыми ведется разговор, были одинаковыми — условие, которое не всегда легко реализовать на практике. В схеме 22-го типа две линии могут иметь совершенно разные импедансы, при этом требования заключаются в том, чтобы балансирующие сети имели разные импедансы, каждая из которых балансирует свою собственную линию. Транслятор может быть установлен в каком-нибудь удобном месте на линии, которое не обязательно должно находиться на полпути между двумя станциями. Кроме того, для того, чтобы создать условия для «пения» в 22-м контуре, необходимо, как видно из рис. 3, чтобы обе линии были разбалансированы одновременно. Если одна линия и ее сеть идеально сбалансированы, дисбаланс в другой не вызовет «пения». Таким образом, 22-й тип по своей сути более стабилен, чем 21-й тип.

Фильтры устанавливаются для пропускания только токов, лежащих в телефонном диапазоне частот, что препятствует прохождению через трансляторы телеграфных и других сигнальных токов, которые могут пе-

редаваться по тем же металлическим цепям. В схеме потенциометры используются для регулировки усиления до желаемого значения.

Две рассмотренные схемы телефонных трансляторов явились базовыми и нашли практическое применение в разработках WEC. Основным стал транслятор типа 22, а его модификации 22A1 и 22A2 были стандартными примерно с 1915 по 1940 год. В трансляторах 22A1 и 22A2 использовались гибридные катушки, балансировочные сети, фильтры и т. д., которые в некотором смысле являются таким же линейным оборудованием, как оборудование транслятора.

5. Установка ламповых трансляторов

Установка этих первых ламповых трансляторов в Браштоне (Brush-ton, 522 мили от Питтсбурга), штат Пенсильвания, показана на рис. 5. Она занимала два шкафа, каждый из которых служил для одного направления потока речи, с дополнительными устройствами, установленными на стене над шкафами.

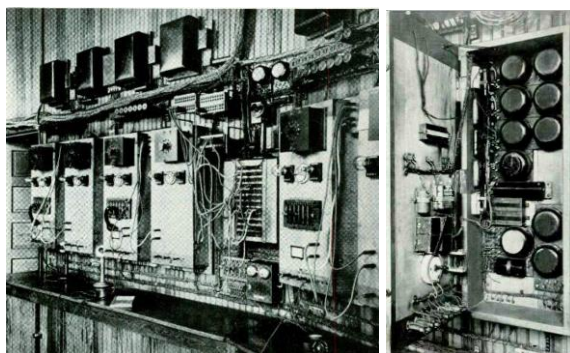


Рис. 5. Группа первых ламповых трансляторов, установленных в Браштоне, штат Пенсильвания, на трансконтинентальной линии (1915 г.).

Вид одного из таких трансляционных шкафов с открытой дверцей показан слева [3].

Fig. 5. A group of the first vacuum-tube repeaters installed at Brushton, Pa., on the transcontinental line (1915). A view of one of these repeater cabinets with the door open is shown on the left [3]

Двухкаскадный усилитель типа 22 использовался для каждого направления передачи, а две лампы, потенциометр регулировки усиления и тестовые гнезда видны на передней панели каждого шкафа. Внутри шкафа находится остальное оборудование, такое как гибридные катушки и катушки замедления, накальные дроссели, сеточные батареи, контрольная катушка и другие аксессуары. Эти трансляторы использовались только для трансконтинентальной линии в Брастоне (*Brushton*), Чикаго, Омахе, Ден-

вере, Солт-Лейк-Сити и Виннемукке¹⁰ (*Winnemucca*, Калифорния). Трансляторы к западу от Миссисипи в некоторых случаях оставались в эксплуатации в течение многих лет, но те, что к востоку от Миссисипи, были заменены в 1917 г. напольным транслятором.

Напольный транслятор показан на рис. 6а. В каждом направлении используется только один каскад усиления, но основное изменение заключается в более компактном монтажном устройстве, которое уменьшило требуемое пространство с примерно 12 кубических футов для трансконтинентального транслятора до 5,5 кубических футов. Производство этого транслятора продолжалось до 1923 года. Трансляторов этого типа было выпущено около двух тысяч.

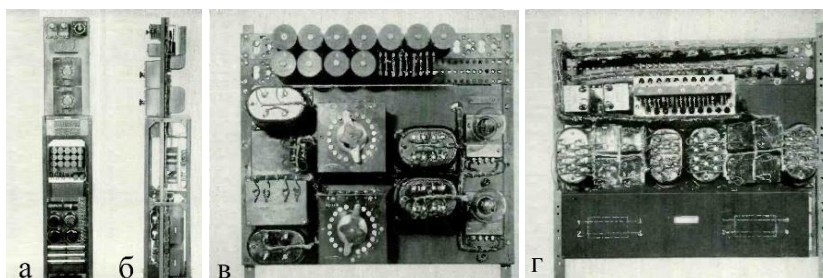


Рис. 6. Напольный транслятор: вид спереди (а) и сбоку (б).

Транслятор типа «Reading»: вид спереди (в) и вид сзади (г) [3, р. 7].

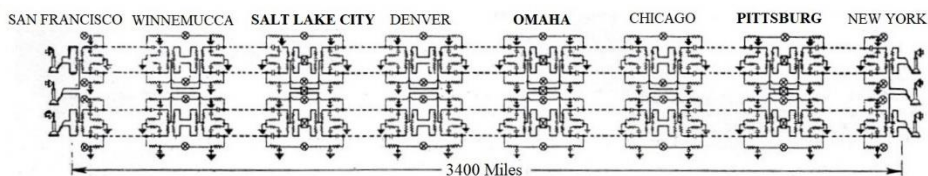
Fig. 6. Floor repeater: front (a) and side (б) view. Repeater type “Reading”: front (в) view and rear (г) view [3, p. 7]

Хотя первые конструкции вышеупомянутых трансляторов были предназначены для открытых цепей, аналогичная конструкция использовалась и в кабеле Бостон-Вашингтон. Однако в 1920 году был разработан транслятор типа *Reading*, рис. 6в. Он использовался только на кабельных цепях между Нью-Йорком и Питтсбургом, и оставался в эксплуатации много лет. Помимо того, что он подходил для кабеля и занимал меньше места, примерно до 1,85 кубических футов (0,05 м³).

Первоначально трансконтинентальная телефонная линия связи с тремя трансляторами была в некотором смысле экспериментальной, и создавалась с целью показать возможности трансконтинентальной телефонии и лампового транслятора, рис. 7 [1, р. 1339]. На случай непредвиденных обстоятельств, в резервных целях, было предусмотрено три электро-механических транслятора. Несмотря на то, что линия была экспериментальной, ее некоторое время использовали для коммерческих целей.

¹⁰ Виннемукка находится на полпути между Солт-Лейк-Сити и Сан-Франциско.

В начале 1915 г. на линии Нью-Йорк — Сан-Франциско было добавлено еще 3 транслятора, а в 1918 г. — еще 2. В итоге к 1919 году общее количество телефонных ламповых трансляторов на линии составило 8 единиц.



Telephone Repeaters indicated by ☒ Telegraph Apparatus indicated by ⊗

Рис. 7. Упрощенная схема телефонных и телеграфных линий Нью-Йорк — Сан-Франциско. 1915 г.

Fig.7. Simplified scheme of telephone and telegraph lines New York - San Francisco. 1915

Телефонные трансляторы в большинстве случаев устанавливались в крупных городах вдоль трассы кабеля. Только в двух местах, Принстоне (*Princeton*, штат Нью-Джерси) и Элктоне (*Elkton*, штат Мэриленд) из-за природных условий на 225-мильной магистральной линии от Бостона до Вашингтона [1, р. 1342, 1343] были возведены здания специально для их эксплуатации. На рис. 8 показано здание, которое было возведено в Принстоне. Максимальная вместимость здания составляла более 500 трансляторов. В Принстоне работало около 200 трансляторов. Конструкция стойки позволяла устанавливать на нее два транслятора типа 22. Транслятор состоял из двух простых трехдиапазонных усилителей, по одному для каждого направления дуплексной открытой проводной линии. Входы и выходы были соединены трансформатором с устройством моста на каждой стороне линии, которая для предотвращения отражений оканчивалась согласующим окончанием. Потенциометры (регуляторы) трансляторов позволяли контролировать смещение на сетке одной из ламп. На рис. 8 показана типичная группа стоек с трансляторами, на каждой стойке установлены два полных транслятора [1, р. 1342, 1344].

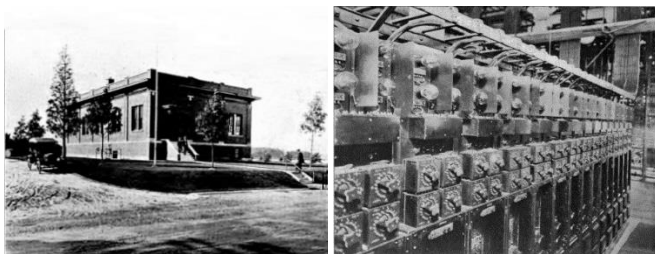


Рис. 8. Здание для трансляторов в Принстоне. Справа группы стоек трансляторов. 1919 г.
Fig. 8. The building for repeaters in Princeton. On the right are groups of repeaters racks. 1919

Применение индуктивной нагрузки на трансконтинентальной трассе уменьшило используемую полосу пропускания примерно до 900 Гц, что привело к плохой разборчивости передаваемой речи. Теоретически частота среза используемых в то время систем нагрузки составляла около 2300 Гц, но затухание в линии быстро росло с увеличением частоты, и на частотах выше 1250 Гц из-за нагрузочных катушек передавалось мало полезной мощности.

6. Открытие трансконтинентальной телефонной линии

Строительство трансконтинентальной телефонной линии было завершено в июне 1914 года, но начало ее эксплуатации для коммерческого использования было отложено до момента, который должен был предшествовать открытию Панамо-Тихоокеанской международной выставки в Сан-Франциско. Несколькими годами ранее, 1908 году, AT&T заявила, что телефонная связь между береговыми линиями двух океанов будет обеспечена к началу международной выставки, которая должна состояться в Сан-Франциско. Интересно отметить, что в год, когда было сделано это утверждение, способ усиления электрического тока на континенте еще не был изобретен.

Публичная демонстрация первых электронных усилителей на усовершенствованных аудионах конструкции Г. Арнольда произошла в пятницу¹¹ 25 января 1915 года. В этот день состоялось торжественное открытие трансконтинентальной телефонной линии связи Нью-Йорк — Сан-Франциско. Мечта президента AT&T Теодора Вейла осуществилась. Это был как долгий сон, который стал явью — телефонная линия длиной 3400 миль стала частью общенациональной телефонной сети *Bell System* с 9000000 телефонами расположенных по всем США, которые соединялись 21000000 милями проводов.

Президент AT&T Теодор Вейл был полон решимости принять участие в первом в истории США телефонном разговоре между океанскими побережьями. Считающийся отцом телефонного бизнеса, Вейл мечтал о создании трансконтинентальной телефонной службы и руководил завершением строительства линии, протянувшейся от Нью-Йорка до Сан-Франциско.

В компании AT&T был отдан строгий приказ о том, что голос президента AT&T Теодора Вейла должен быть услышан первым на линии, так как она приурочена к открытию Панамо-Тихоокеанской международной выставки в Сан-Франциско. Это привело к некоторым творческим процедурам тестирования, которые гарантировали, что ни один голос инженера не будет разноситься от побережья к побережью. Около 1500 сотрудников

¹¹ В этот день началась Августовская операция (вторая) — наступление 25 января — 13 февраля 1915 г. немецких армий против русской армии в районе Августова.

AT&T были размещены вдоль телефонной линии в день демонстрации, готовые исправить любые повреждения.

Вейл планировал участие в инаугурационном звонке из своего офиса в Нью-Йорке. Травма ноги вынудила его остаться на острове Джекилл¹², где он зимовал вместе с другими титанами промышленности США, которые тоже спасались от суровых северо-восточных зим. Специально ко дню открытия линии на остров по просьбе Вейла в гостиную *Jekyll Island Club* было протянуто 1100 миль медного кабеля для телефонной линии, рис. 9. Позже Вейл в разговоре с Ватсоном отметил, что их обмен стал самым длинным междугородным звонком в истории США. Линия связи от острова Джекилл до Сан-Франциско через Бостон простиралась на 4750 миль.

Торжественные первые телефонные разговоры состоялись 25 января 1915 г. в пяти местах: Нью-Йорке, Сан-Франциско, Белом доме в Вашингтоне (округ Колумбия), Бостоне и на острове Джекилл, где в этот момент находился президент AT&T Теодор Вейл. Телефонная линия Вейла включала президента США Вудро Вильсона в Вашингтоне (округ Колумбия), изобретателя телефона Александра Белла в Нью-Йорке, помощника Белла Томаса Ватсона в Сан-Франциско и бизнесмена и филантропа Генри Хиггинсона (*Henry Lee Higginson*) в Бостоне.

Когда приветствие «Здравствуйте, остров Джекилл» разнеслось по телефонным линиям, ему ответил Вейл из одной из гостиных легендарного клуба острова Джекилл. Свидетелями этих замечательных событий, разворачивавшихся в гостинной, были бизнес-магнаты и товарищи по клубу *Jekyll Island Club*: Дж. П. Морган-младший (*J. P. Morgan*) и Уильям Рокфеллер-младший (*Jr., William Rockefeller*), а также выдающиеся американские архитекторы Уильям Уэллс Босворт¹³ (*Welles Bosworth*) и Сэмюэл Брек Паркман Тробриндж¹⁴ (*S. B. P. Trowbridge*), рис. 9.

¹² Остров *Jekyll Island* расположен у Атлантического побережья штата Джорджия в часе езды на юг от города Саванна и знаменит прежде всего своим клубом *Jekyll Island Club*. Клуб основан американскими миллионерами конца XIX века. Остров также известен белыми пляжами и умиротворяющей уединенностью. В ноябре 1910 года на острове Джекилл состоялась встреча крупных держателей государственного долга США. Съезд «денежного треста», как прозвали пронирыливые журналисты трансатлантический альянс финансовых олигархов, обсуждал несколько вопросов. Среди них обсуждалась возможность свержения русского царя и вырабатывалась стратегия совместного финансирования революционных террористических групп в Российской империи.

¹³ Босворт Уильям (08.05.1869—03.06.1966) спроектировал кампус Массачусетского технологического института в Кембридже, штаб-квартиру компании AT&T в Нью-Йорке (1912 г.), особняк Теодора Н. Вейла в Морристауне (штат Нью-Джерси) и др.

¹⁴ Тробриндж Сэмюэл Брек Паркман (20.05.1862—29.01.1925) спроектировал элегантные неоклассические банки, отели, общественные здания и жилые дома для состоятельных клиентов. Среди заказов Тробринджа были здание *B. Altman Building* в Нью-Йорке, *Palace Hotel* в Сан-Франциско и *Mellon National Bank* в Питтсбурге. Фирма Тробринджа спроектировала мемориал Вудлона (*Woodlawn*, 1925 г.) и мавзолей Уильяма Портера (*William Porter*, 1927 г.), Линна (*Lynn*, 1924 г.) и др.



Рис. 9. Карта с указанием расположения острова Джекилл. Здание легендарного *Jekyll Island Club* (1910 г.). Первый трансконтинентальный телефонный разговор Америки 25 января 1915 года. В гостиный клуб сидят ¹⁵ (слева направо): Уильям Рокфеллер-младший и президент AT&T Теодор Н. Вейл. Присутствуют, стоят (слева направо) известные американские архитекторы Уильям Уэллс Босворт и Сэмюэл Брек Паркман Тробрюбридж и член клуба *Jekyll Island Club* Дж. П. Морган-младший.

Fig. 9. Map showing the location of Jekyll Island. Building of the legendary Jekyll Island Club (1910). America's first transcontinental telephone conversation, January 25, 1915. Seated in the club lounge (left to right): William Rockefeller Jr. and AT&T President Theodore N. Vail (far right). Present, standing (left to right) renowned American architects William Welles Bosworth and Samuel Breck Parkman Trowbridge and Jekyll Island Club member J. P. Morgan Jr.

Этот один из пятисторонних звонков с острова Джекилл, ставший знаменитым, произошел около 16:00 (по восточному времени) и впервые сделал возможным мгновенный разговор между побережьями. Захватывающий момент торжественно открыл новую эру трансконтинентальной телефонной связи для растущего населения США и до сих пор он отмечается в связи с его историческим значением.

Подключение трансконтинентального вызова занимало около 10 минут, так как соединение нужно было настраивать шаг за шагом с оператором коммутатора в каждом городе на протяжении всего пути.

Вейл принял участие в первой телефонной конференции между побережьями. В разговоре участвовали президент Вудро Вильсон, звонивший из Белого дома, и высокопоставленные лица из Нью-Йорка, Бостона и Сан-Франциско.

Перед разговором президента США Вудро Вильсона ¹⁶ (*Woodrow Wilson*, 28.12.1856—03.02.1924), было предложено Александру Грэхему Беллу и Томасу А. Ватсону (*Thomas Augustus Watson*, 18.01.1854—13.12.1935) повторить свой знаменитый первый телефонный разговор, рис. 10, чтобы про-

¹⁵ Wheatley Thomas. Flashback: The first transcontinental phone call was made from the Jekyll Island Club in 1915. Atlanta magazine. January 25, 2019. URL: <https://www.atlantamagazine.com/news-culture-articles/flashback-the-first-transcontinental-phone-call-was-made-from-the-jekyll-island-club-in-1915/> (25.02.2023).

¹⁶ Вудро Вильсон был 28-м президентом США с 4 марта 1913 г. по 4 марта 1921 г. Он памятен для русской истории тем, что отказал в помощи правительству адмирала Колчака, когда к нему обратился князь Георгий Евгеньевич Львов, специально приехавший в октябре 1918 года в США как представитель Верховного Правителя Российского государства.

демонстрировать значимость события, возникновение единой телефонной системы, охватившей всю территорию Соединенных Штатов. Александр Белл находился на улице Дей (*Dey Street*) 15 в Нижнем Манхэттене Нью-Йорка, а его бывший помощник Т. Ватсон — на авеню Грант (*Grant*) 333 в Сан-Франциско. На столе перед доктором Беллом находилась копия его оригинального телефона. За столом также сидел главный вице-президент AT&T Co. мистер Бетеллом, перед которым стоял стеклянный ящик с куском провода, по которому доктор Белл и мистер Ватсон вели первый в мире телефонный разговор.



Рис. 10. Александр Грэм Белл собирается позвонить в Сан-Франциско из Нью-Йорка в рамках первого трансконтинентального телефонного звонка¹⁷. Слева направо: У. Н. Бетелл, главный вице-президент AT&T Co., председательствующий; distinguished Джордж Макэнени, президент Совета олдерменов, Нью-Йорк; Джон Дж. Карти, главный инженер AT&T Co.; Александр Грэм Белл, Джон Пуррой Митчел, мэр Нью-Йорка, С. Э. Йост, президент *Nebraska Telephone Co.*, Омаха, distinguished Уильям А. Прендергаст, инспектор города Нью-Йорка. 25 января 1915 г. Томас Ватсон из Сан Франциско разговаривает с А. Беллом. Четыре телефона¹⁸, показанные здесь, являются оригинальными устройствами, использовавшимися во время этого исторического звонка.

Fig. 10. Alexander Graham Bell, about to call San Francisco from New York in the first transcontinental telephone call. Left to Right: U.N. Bethell, Senior Vice-President AT&T Co., presiding; Hon. George McAneny, President Board of Alderman, New York City; John J. Carty, Chief Engineer, AT&T Co.; Alexander Graham Bell, John Purroy Mitchell, Mayor of New York; C.E. Yost, President of Nebraska Telephone Co., Omaha; Hon. William A. Prendergast, Comptroller of the City of New York. January 25, 1915. Thomas Watson from San Francisco talking to A. Bell. The four phones seen here are the original devices used in that historic call

Старые партнеры разыграли спектакль. В 16 часов 30 минут А. Белл взял телефонную стойку с микрофоном в Нью-Йорке, и сказал А. Ватсону, находившегося на Панама-Тихоокеанской международной выставке в Сан-Франциско, знаменитую фразу, произнесенную им в первом телефон-

¹⁷ First Transcontinental Telephone Call. URL: <https://www.squaducation.com/blog/first-transcontinental-telephone-call-0> (25.02.2023).

¹⁸ AT&T makes the first transcontinental call, 100 years ago (pictures). URL: <https://www.cnet.com/pictures/100-years-ago-the-first-transcontinental-call-pictures/null/> (26.02.2023).

ном разговоре 10 марта 1876 года: «Ватсон, идите сюда, я хочу Вас увидеть» (*Watson, come here, I want you.*). Зрители, сидевшие рядом с А. Беллом, засмеялись и зааплодировали. Но на этот раз А. Ватсон ответил иначе, применительно к реальной ситуации: «Я был бы рад приехать, мистер Белл, но это займет больше недели» (*I would be glad to come, Mr. Bell, but it would take more than a week.*)

Затем к телефонному общению подключился в Вашингтоне президент Вудро Вильсон (рис. 11), который отметил, что «у него создается такое впечатление, как будто он ведет разговор со всем континентом». Затем президент Вильсон¹⁹ обратился к г-ну Ватсону: «Я хочу сказать вам, г-н Ватсон, что считаю за честь иметь возможность выразить восхищение изобретательским гением и научными знаниями, которые сделали это возможным, и мою гордость за то, что этот жизненный провод должен был быть протянут через всю Америку, как образец нашей энергии и нашей предприимчивости. Я хочу передать вам мои личные поздравления, сэр»



Рис. 11. Президент США Вудро Вильсон (1919 г.). Почтовая открытка (в центре) с трассой трансконтинентальной телефонной линии связи Нью-Йорк — Сан-Франциско, выпущенная в честь первого телефонного звонка на Панама-Тихоокеанской международной выставке в Сан-Франциско. 1915 г. Соединение континента²⁰ рисунок Франклина Бута, сделанный AT&T в 1940 г. в ознаменование 25-й годовщины трансконтинентальной телефонной связи.

Fig. 11. US President Woodrow Wilson (1919). Postcard (center) showing the route of the New York – San Francisco transcontinental telephone line, issued to celebrate the first telephone call at the Panama-Pacific International Exposition in San Francisco. 1915. A Continent is Bridged drawing by Franklin Booth by AT&T in 1940 to commemorate the 25th anniversary of transcontinental telephone service

Генри Ли Хиггинсон и группа официальных лиц ждали в Бостоне. Перед ними стоял новейший телефонный аппарат — настольный телефон-подсвечник *Western Electric Model 20AL*. В 20:00 по восточному времени

¹⁹ First Official Transcontinental Telephone Call.

URL: <https://info.mysticstamp.com/this-day-in-history-january-25-1915/> (16.03.2023).

²⁰ “A Continent Is Bridged,” an illustration by Franklin Booth, drawn for AT&T in 1940 to mark the 25th anniversary of transcontinental telephone service.

URL: <https://www.flickr.com/photos/eoskins/35639610180> (25.02.2023).

Хиггинсон поднял трубку и позвонил Ватсону, ожидавшему его в Сан-Франциско. После обмена любезностями Хиггинсон передал телефон мэру Бостона Джеймсу М. Керли (*James M. Curley*), который разговаривал со своим коллегой мэром Сан-Франциско Джеймсом Рольфом (*James Rolph*). Теодор Вейл с острова Джекилл также присоединился к разговору с Хиггинсоном, помимо этого, множество других официальных лиц присоединялись к участию в этом историческом событии. Телефон *WEC 20AL*, которым пользовался Хиггинсон, теперь находится в музее *Spark Museum of Electrical Invention* в городе Беллингеме (*Bellingham*, штат Вашингтон). Приглашение Хиггинсона для участия в мероприятиях, связанных с первым трансконтинентальным телефонным звонком, явилось данью благодарности, поскольку фирма *Lee, Higginson and Company* была одним из первых финансовых спонсоров *American Bell* (которая в 1900 году стала *American Telephone and Telegraph*).

Торжественный звонок 25 января занял три с половиной часа, с 16:30 до 20:00 часов по нью-йоркскому времени. Затем Бостон присоединился к другим разговорам — к одному даже на кантонском диалекте — между основателем китайской телефонной станции в Сан-Франциско и должностным лицом Южно-Тихоокеанской железной дороги в Бостоне.

Вступительные мероприятия были лишь прелюдией. Выставки и демонстрации устраивались ежедневно и включали дистанционные «беседы» с известными людьми, такими как Томас Эдисон, адмирал Пири (*Admiral Peary*) и многими другими.

Во Дворце свободных искусств (*Palace of Liberal Arts*) на территории выставки была выставлена экспозиция *AT&T* о трансконтинентальной телефонной линии. Экспозиция стала одним из самых популярных мест со дня открытия и до дня закрытия международной выставки 4 декабря 1915 года. Увиденное на выставке захватило воображение публики, которое отразилось в песне *The Ziegfeld Follies* “*Hello, Friisco*”, самой популярной мелодии 1915 года.

С 1 марта началась коммерческая трансконтинентальная телефонная связь. Звонок между Нью-Йорком и Сан-Франциско при небольшой слышимости первые 3-минуты разговора стоил \$20,70 (в современных ценах это \$515 на 2018 г.), а уже каждая дополнительная минута — \$6,75. Одна общенациональная телефонная линия могла принимать только один звонок за 1 раз.

В том же 1915 году, 29 сентября, была произведена первая демонстрация трансконтинентальной радиотелефонной передачи из Нью-Йорка в Арлингтон²¹, а затем в Сан-Франциско и Гонолулу.

²¹ Арлингтон (*Arlington*), пригород Вашингтона на правом берегу реки Потомак, шт. Вирджиния.

7. Телефон: установление отношений

Несмотря на некоторые недостатки ранней телефонной системы, телефоны произвели революцию в области связи, хотя, возможно, и не в такой степени, как оптимистично предсказывала Телефонно-телеграфная компания Новой Англии (*New England Telephone and Telegraph Company*). В 1915



Рис. 12. Реклама из «Вермонт Стандарт» от 28 января 1915 года.

Fig. 12. Advertisement from the January 28, 1915, *Vermont Standard*

году реклама, размещенная этой компанией, возвещала о социальных изменениях, которые, как она утверждала, станут результатом трансконтинентальной телефонной системы. В рекламе²² изображена классически одетая женщина с повязкой на голове, на которой написано слово «наука», рис. 12. Ее руки раскинуты от побережья к побережью, Соединенные Штаты перед ней, и в каждой руке она держит по телефону. За заголовком

«Триумф науки» следует следующая фраза: «Эта занятая, прогрессивная нация находится сегодня на заре новой эры коммерческого и социального развития. Это средство, с помощью которого человеческий голос с его малейшими интонациями и признаками личности может мгновенно разноситься по всему континенту, было обеспечено. Разговоры по телефону от Атлантики до Тихого океана теперь свершившийся факт».

Далее в рекламе утверждается: «Воображение может лишь слабо уловить, а тем более попытаться измерить далеко идущее значение такого грандиозного достижения. Сто миллионов человек будут ежедневно пользоваться системой связи, не знающей ни Востока, ни Запада, ни Севера, ни Юга. Диалекты, провинциализмы, групповые предрассудки должны в конце концов уступить место более тесному союзу, лучшему пониманию, более тесному товариществу, которое устанавливает человеческий голос. Соседство целой нации укрепляется за счет снятия физических ограничений веков».

В день открытия трансконтинентальной телефонной линии связи Нью-Йорк — Сан-Франциско и в многие другие дни она сблизила людей... как и предсказывала реклама *New England Telephone and Telegraph* 1915 года. Это был безусловный успех компании AT&T, который показал, какой значимый научный результат может быть, достигнут при наличии необходимого финансирования, если привлечь первоклассных ученых.

²² Shurtleff Jennie. The telephone: making connections.

URL: <https://www.woodstockhistorycenter.org/articles/2021/2/26/the-telephone-early-connections> (25.02.2023).

8. Отклик искусства на триумф науки

Произошедшее событие вызвало фурор в обществе. Междугородный телефонный сервис стал доступен в любое время. В Нью-Йорке хитом сезона на Бродвее стал мюзикл «Здравствуй, Сан-Франциско» (*Hello, Frisco*). Прозвучавшая в нем песня «*Hello, Frisco*» на слова Gene Buck²³ (*Edward Eugene Buck*, 07.08.1885—24.02.1957) была представлена как номер в *Ziegfeld Follies*²⁴ 1915 года. Документы²⁵ говорят, что она была написана как приветствие первой трансконтинентальной телефонной связи в Соединенных Штатах.

В 1943 году был снят фильм²⁶ «*Hello, Frisco, Hello*» (Здравствуй, Сан-Франциско, *Hello*) с участием Элис Фэй (*Alice Faye*), Джона Пейна (*John Payne*), Линн Бари (*Lynn Bari*) и Джека Оуки (*Jack Oakie*), рис. 13. Фильм в жанре водевиля рассказывал историю любви его героев в Сан-Франциско во время открытия Панама-Тихоокеанской международной выставки, на которой Александр Грэхем Белл сделал первый трансконтинентальный телефонный звонок из Нью-Йорка в Сан-Франциско.



Рис.13. Афиши фильма «Hello, Frisco, Hello» и Элис Фэй. 1943 г.

Fig.13. Posters for the film “Hello, Frisco, Hello” and Alice Faye. 1943

²³ Джин Бак сотрудничал с широко известным бродвейским импресарио Флоренцем Зигфельдом (англ. Florenz Ziegfeld, 21.03.1867—22.07.1932), сначала над *Ziegfeld Follies* (1912—1926), а затем над созданием *Midnight Frolics* (1914—1926). Он сочинял пародии и тексты песен, а также выступал в качестве искателя талантов.

²⁴ В период с 1907 по начало 1930-х годов «Безумства Зигфелда» (англ. *Ziegfeld Follies*) были самым зрелищным и известным американским ревью (театральная постановка, состоящая из песен, пародий и танцевальных номеров). Однако больше всего «Безумства Зигфелда» прославились тем, что в них участвовало множество молодых, красивых, искусно одетых танцовщиц, которые часто делали немного больше, чем просто дефилировали или красиво позировали среди декораций, которые образовывали живую картину или неожиданную сцену. Многие из песен, дебютировавших в *Follies*, впоследствии стали стандартами популярной американской музыки.

²⁵ Bliss Jessica. Father, son part of telephone history / The Tennessean. Feb.7, 2015. URL: <https://www.tennessean.com/story/news/2015/02/07/first-transcontinental-phone-call/23010719/> (24.02.2023).

²⁶ Фильм был сделан в Technicolor и выпущен компанией 20th Century-Fox.

Это очаровательный исторический мюзикл с Элис Фэй в роли салонной певицы, влюбленной в карьериста Джона Пейна, который положил глаз на Линн Бари, рис. 14. Берберийское побережье сверкает в самом ярком цвете компании 20th Century-Fox. Тонкий сюжет позволяет Элис спеть во вступительном номере одну из своих самых известных песен «*Hello, Frisco, Hello*», которая переходит прямо в «*You'll Never Know*» (Вы никогда не узнаете). Последняя песня — лучшая из всех, которые спела в фильме Фэй. Она поет ее в картине трижды. С тех пор, как эта песня была представлена в сюжете фильма, она стала фирменной песней Элис Фэй. Под нее танцевали и мечтали тысячи пар времен Второй мировой войны. Элис Фэй получила в 1943 году премию «Оскар» Американской киноакадемии за лучшую оригинальную песню «*You'll Never Know*». Эта запоминающаяся песня была повторена ею в следующем году в военном мюзикле «Четыре Джилл в джипе» (*Four Jills in a Jeep*). Она была записана бесчисленное количество раз, однако никто не поет ее так, как Фэй.

С блестящим актерским составом второго плана, включая Джека Оуки, Джун Хэвок, Лэрда Крегара (*Laird Cregar*) и Уорда Бонда (*Ward Bond*), это, вероятно, лучший фильм, в котором Фэй встречается с одним из ее любимых главных героев, Джоном Пейном. У него не так много шансов спеть, как у нее, но он считался самым надежным ведущим актером компании 20th Century-Fox в мюзиклах и соответствовал ей на каждом шагу. Но именно ее задумчивая интерпретация заглавной мелодии, сфотографированная крупным планом с любовью, показывает, что такое звездное качество. В одном из телеинтервью Элис Фэй спросили²⁷, как она стала звездой, и она ответила: «Я могла немного петь, немного танцевать и немного играть, но у меня были красивые ноги».



Рис.14.Фрагменты из мюзикла «Здравствуй, Сан-Франциско» (*Hello, Frisco*)²⁸. 1943 г.

Fig. 14. Fragments from the musical “Hello, San Francisco” (*Hello, Frisco*). 1943

Приятный и мелодичный голос Элис Фэй — именно этого хотели уставшие от войны зрители в 1943 году.

²⁷ Hello Frisco, Hello (1943) – User Reviews – IMDb.

URL: https://www.imdb.com/title/tt0035982/reviews?ref_=tt_urv (25.02.2023).

²⁸ Hello, Frisco, Hello & You'll Never Know (1943). YouTube.

URL: <https://www.youtube.com/watch?v=tFmzDfjxOto> (26.02.2023).

9. Экспозиция компании Ли де Фореста на Панама-Тихоокеанской международной выставке 1915 г.

Панамо-Тихоокеанская международная выставка открылась 20 февраля 1915 года; Сан-Франциско был украшен богатой архитектурой в европейском стиле с множеством технологических чудес. Город возобновил свою роль электростанции Западного побережья менее чем через десять лет после почти полного разрушения в результате землетрясения и пожара 1906 года.

Концепция всемирной ярмарки не была новой для Сан-Франциско, поскольку в конце XIX века в нем состоялось несколько выставок. Идея Панамо-Тихоокеанской международной выставки формировалась с 1890-х годов и приурочивалась к завершению строительства Панамского канала. Само строительство канала было подвигом, за 50 лет строительства его окрестили «Тринадцатым подвигом Геракла». Так было и с созданием экспозиции, начиная с размещения 300000 кубических ярдов насыпи, чтобы создать землю для участка из того, что раньше было заливом Сан-Франциско.

В выставке приняли участие 31 страна, включая Францию и Японию, а также сотни других экспонентов и концессий, несмотря на боевые действия в Европе во время Первой мировой войны. Когда выставка наконец открылась, то она представляла собой микрокосмос мира — пространство монументальной архитектуры²⁹, наполненное новыми технологиями, продуктами и международным культурным экспортом, призванным заставить любого гостя испытать эмоциональное воздействие от увиденного, рис. 15.



Рис. 15. Центральная территория выставки, простирающаяся от Дворца машин в левом верхнем углу до Дворца изящных искусств в правом нижнем углу. Справа Золотая медаль выставки, ее лицевая и обратная стороны.

Fig. 15. The fair's central grounds, stretching from the Palace of Machinery at the top left to the Palace of Fine Arts at the lower right. On the right, the Gold Medal of the exhibition, its obverse and reverse sides

²⁹ Oatman-Stanfor Hunter. From Rubble to Riches: The World's Fair That Raised San Francisco From the Ashes. URL: <https://www.collectorsweekly.com/articles/the-worlds-fair-that-raised-san-francisco-from-the-ashes/> (15.03.2023).

Посетители выставки были в шоке, проходя через арку в огромной живой изгороди, выходящей на Каштановую улицу (*Chestnut Street*). Они шли мимо Дворца садоводства (*Horticulture Palace*) с его искусно благоустроенными садами, а далее, пройдя под Башней драгоценностей (*Tower of Jewels*) попадали во Двор Вселенной (*Court of the Universe*). Вокруг этого Двора были построены восемь основных дворцов, посвященных продуктам питания, сельскому хозяйству, транспорту, шахтам и металлургии, образованию и социальной экономике, гуманитарным наукам, производителям и различным отраслям. На дальнем западном краю этого архитектурного ансамбля находился Дворец изящных искусств (*Palace of Fine Arts*), который огибал гигантскую лагуну. За этим дворцом возвышались павильоны, посвященные отдельным народам и площадки для различных видов спорта, рис. 15. На востоке располагались Дворец машин (*Palace of Machinery*, рис. 16) и Зона радости (*Joy Zone*), за которой открывался шумный коридор развлечений.

Forest Radio Telephone and Telegraph Company подошла к выставке в достаточно преуспевающем состоянии. Она смогла устроить большую экспозицию своих радиотехнических аппаратов. Зная интерес публики, а особенно атташе иностранных государств к различным типам радиоприборов, компания продемонстрировала беспроводные телеграфные и телефонные аппараты с усилителем на аудионе, аудионный детекторный приемник и регенеративный приемник типа ультрааудиона, комбинированный детекторный приемник с усилителем (рис. 16), а также устройства для повторной подачи голосовых импульсов или других сигналов независимо от того, поступали они по проводам или нет.

Среди представленных компанией Фореста аппаратов были и примечательные экспонаты, в частности, беспроводной набор связи (рис. 16), который использовался в беспроводной телефонии на Лакаванской железной дороге (*Lackawanna Railroad*) в 1914 году, рис. 16 [4].

В представленном радиотелефонном оборудовании для железной дороги использовались дуговой передатчик *De Forest* мощностью 1 кВт, усилитель *Audion* и детектор *Audion*, рис. 16. Для перекрытия шума поезда к детекторному приемнику подключался двухкаскадный усилитель с 50—60 кратным усилением. Эта аппаратура себя хорошо зарекомендовала на Делавэрской (*Delaware*), Лакаваннской (*Lackawanna*) и Западной железных дорогах (*Western Railroad*) во время девятидневного паралича телефонных проводов, когда разразилась февральская метель 1914 г. Не возникало никаких затруднений при телефонной связи от Скрэнтона (*Scranton*) до Бингемтона (*Binghamton*) на расстоянии 67 миль (108 км) по суровой лесистой и гористой местности.



Рис. 16. Панамо-Тихоокеанская Экспо (1915 г.), Дворец свободных искусств (а). Комбинированный детектор DeForest с однокаскадным усилителем стоимостью \$200 (б). Аппаратура радиотелефонной связи для железных дорог (в).

Fig. 16. Pan Pacific Expo (1915), Palace of Liberal Arts (a). DeForest Combination Detector & 1-Stage Amplifier – \$200 (б). Radiotelephony for Railroads (в)

Поскольку аудионный усилитель был шагом вперед в использовании усиливающих устройств, в частности, рентгенографии, то компания де Фореста дала описание работы аудиона (триода) в своем буклете, который продавался на выставке. Отметим то, как в буклете³⁰ описана роль сетки в работе триода: «Одним из наиболее важных и совершенно новых элементов во всем этом странном устройстве является “элемент сетки”, расположенный поперек пути движущихся ионов (странников, как следует из их греческого названия) ...Было заявлено, что это важный элемент трансконтинентальной телефонии, но было ли это фактом или нет, здесь не подлежит рассмотрению».

Посетители экспозиции компании де Фореста могли прослушивать беспроводные сообщения из Науэна (Германия) на детекторный приемник с аудионным усилителем, которые были приняты антенной, свисающей с Башни драгоценностей. В кабинке был установлен ультрааудионный приемник, на который принимались беспроводные сигналы, и время от времени посетители в кабинке могли услышать разговоры по беспроводному телефону с четырех беспроводных телефонов в бухте.

Для постоянного прослушивания программ посетителями выставки на радиоприемники де Фореста радиоинспектор США Эллери Стоун (*Ellery Stone*) договорился с Доком Херолдом (*Charles D. Herold*) в Сан-Хосе о трансляции радиопередач с помощью его дугового передатчика. Многие люди, послушав радиопередачу, принимались искать провода, которые, по их мнению, должны были подводить, без сомнения, звуковой

³⁰ Bart L. Lee de Forest in San Francisco in 1915. URL: <https://californiahistoricalradio.com/wp-content/uploads/2020/10/Lee-de-Forest-in-San-Francisco-in-1915-.pdf> (15.03.2023).

сигнал к громкоговорителю радиоприемника. Нужно отметить, что в 1915 году радиоприемник еще не получил широкого распространения в качестве домашнего информационного устройства, все еще было дешевле использовать проволочную систему.

10. «Шутки» Ли де Фореста

Несколько раз в день в маленьком амфитеатре компании AT&T читалась популярная лекция, в которой лектор доступным языком излагал историю только что открытой трансконтинентальной телефонной линии между Нью-Йорком и выставкой в Сан-Франциско. В конце каждой лекции тем, кто интересовался, предоставлялась возможность послушать, как какой-нибудь человек говорит в Нью-Йорке, после чего нью-йоркский приемник переключался на Кони-Айленд³¹ (*Coney Island*), чтобы жители Тихоокеанского побережья могли слышать свист и рев бурюнов на Атлантике.

Докладчик очень подробно описывал линию компании AT&T и уделял должное внимание использованию в ней нагрузочных катушек Пупина, которые выравнивали или уравнивали линию для всех частот, используемых в человеческой речи. Но он ни словом не обмолвился ни о каких-либо телефонных усилителях или трансляторах на 3400-мильном отрезке провода, об устройстве, которое более всего остального сделало возможным этот удивительный подвиг передачи голоса. Публике представлялось, что голос отдаленного оператора слышен столь ясно и отчетливо без помощи какого-либо усилителя. В конце этих лекций компания AT&T раздавала всем аккумуляторные брошюры с надписью на обложке: «История большого достижения. Телефонная связь от побережья до побережья» (*The Story of a Great Achievement. Telephone Communication from Coast to Coast*).

Ли де Форест внимательно изучил эту брошюру и провел всю ночь за составлением брошюры, которая должна была бы внешне по размеру, цвету и формату быть факсимиле того «исторического» документа, выпущенного компанией AT&T, но с другим названием: «История большого достижения, которое сделало возможным телефонную связь от побережья до побережья» (*The Story of a Great Achievement. Which Made Telephone Communication from Coast to Coast Possible*) [5, р. 328—329.]. На следующее утро де Форест нашел типографию, и уже на следующий день работники киоска Де Фореста раздавали это второе издание «Истории большого достижения» в больших количествах тысячам зевак, только что вышедших

³¹ Кони-Айленд — полуостров, бывший остров, расположенный в Бруклине. Название происходит от искаженного нидерландского *Konijn Eiland* — Кроличий остров.

из телефонной площадки Белла, поражающихся тому, что они слышали, и озадаченных тем, как это вдруг стало возможным. Это второе издание расширило их понимание!

На страницах буклета де Фореста публике были представлены несколько кратких утверждений, которые случайно оказались полностью отсутствующими в соответствующем буклете, выпущенном компанией AT&T. Там была очень кратко описана забытая глава в истории телефона — 20-летний тщетный поиск инженерами телефонного транслятора или усилительного реле, которое должно было бы быть одновременно чрезвычайно чувствительным, свободным от тонкой и частой настройки, но которое усиливало бы каждое изменение человеческого голоса без искажений, что сделало бы возможной передачу голоса через всю Северную Америку.

Этот усилитель был наконец разработан, но не инженерами-телефонистами, чьи умы годами крутились в старой колее приемник — микрофон. В 1912 году Ли де Форест обнаружил, что когда странное устройство под названием *Audion* было правильно подключено к линии между передатчиком и приемником, оно фактически усиливало голосовые токи, обеспечивая воспроизведение с идеальной точностью без малейшего следа запаздывания или искажения, но с значительным увеличением громкости. Именно это устройство, запатентованное де Форестом в 1907 году и проданное им компании AT&T в 1913 году, оказалось единственным, которое позволило говорить от Панамо-Тихоокеанской выставки до Нью-Йорка или штата Мэн. Для доказательства этого факта де Форест установил позади стенда своей компании длинную красивую вывеску с надписью: «Усилитель *De Forest Audion*, лицензированный американской компанией *Tel. and Tel. Co* в качестве телефонного реле, сделал возможной трансконтинентальную телефонную связь» (*The De Forest Audion Amplifier Licensed to the American Tel. and Tel. Co as a Telephone relay made the Trans Continental Telephone Service possible*). После этого де Форест со своим помощником Майерсом (*E. B. Myers*) посмеивались, наблюдая, как инженеры «*Bell*» один за другим небрежно идут по проходу и читают косые информационные сообщения, истину которых они слишком хорошо понимали, чтобы пытаться отрицать [5, p. 330].

Перед закрытием выставки компания де Фореста была удостоена за свою экспозицию Гран-при и Золотой медали³² (рис. 15), как это было на Всемирной выставке в Сент-Луисе в 1904 году.

³² Золотая медаль Панамо-Тихоокеанской международной выставки 1915 года была отчеканена из позолоченной бронзы, имела диаметр 70 мм и вес 133,8 грамм. Она присуждалась в качестве главного приза за различные изделия или экспонаты.



Рис. 17. Экспозиция комплектов для беспроводной телефонии компании де Фореста (1915 г.). Справа транспарант, установленный Ли де Форестом в пределах своей экспозиции во Дворец свободных искусств [6].

Fig. 17. Exposition of sets for wireless telephony of the de Forest company (1915). On the right is a banner installed by Lee de Forest within his exposition at the Palace of Liberal Arts [6]

Выставка длилась немногим более 9 месяцев и закрылась 4 декабря 1915 года, ее посетили 18876438 человек, что намного превысило даже самые оптимистичные прогнозы. Около 45 миллионов долларов ушло в экономику штата, а на экспозиции было потрачено около 12 миллионов долларов, что составляет около 565 миллионов долларов в ценах 2012 года. Снос строений выставки начался почти сразу после ее закрытия, так как по договору большая часть земли должна была быть возвращена ее первоначальным владельцам. Единственным сооружением выставки, дожившим до наших дней, является Дворец искусств, который стоит на том же месте, где и был построен почти 108 лет назад.

11. Заключение

Электронные вакуумные лампы, разработанные группой Арнольда, стали основой телефонных трансляторов, с которыми инженеры AT&T добились успехов в осуществлении первой в мире трансконтинентальной телефонной связи и тем самым выполнили поставленную президентом компании AT&T Теодором Вейлом задачу и продемонстрировали свои результаты на Панама-Тихоокеанской международной выставке. Проблемы лампового транслятора были решены благодаря объединению корпоративных интересов и новейших научных достижений.

Вейл ненавидел конкуренцию. Он считал, что единая высококачественная сеть может быть создана только в том случае, если вся телефонная инфраструктура страны будет находиться под контролем одной фирмы. Предпочтительно его собственной. В 1915 году Вейл³³ в общении с

³³ Fung Brian. This 100-year-old deal birthed the modern phone system. And it's all about to end / The Washington Post. December 19, 2013. URL: <https://www.washingtonpost.com/news/the-switch/wp/2013/12/19/> (24.02.2023).

аудиторией железнодорожных комиссаров сказал: «Если бы не было системы *Bell*, а были только разрозненные отдельные компании или группы компаний, то ни одна линия протяженностью более нескольких сотен миль не была бы построена, а если бы и была построена, то не могла бы эксплуатироваться столь удовлетворительно... Эффективная работа коммерческой телефонной связи может поддерживаться только тогда, когда каждый оператор на линии и подключенная к нему система находятся под единым управлением».

Первый трансконтинентальный разговор навсегда изменил мир. Этот звонок соединил людей, находящихся за тысячи километров друг от друга, продемонстрировал важность общения и стимулировал столетие инноваций, формирующих мир, в котором мы живем сегодня.

Список литературы

1. Gherardi B., Jewett F. B. Telephone repeaters // Transactions of the American institute of electrical engineers. July to December, 1919. Vol. 38, no. 2. P. 1287—1345.
2. Jewett F. B. Dr. George A. Campbell // The Bell System Technical Journal. October, 1935. Vol. 14, no. 4. P. 553—557.
3. Smith C. A. Fifty years of telephone repeaters // Bell Laboratories Record. January. 1949. Vol. 27, no. 1. P. 5—9.
4. Radiotelephony for Railroads // Electrical World. May 30, 1914. Vol. 63, no. 22. P. 1269.
5. Forest de Lee. Father of Radio. The Autobiography. 1st edition. Chicago : Wilcox & Follett Co., 1950. 502 p.
6. Todd F. M. The Story of the Exposition: Being the Official History of the International Celebration Held at San Francisco in 1915 to Commemorate the Discovery of the Pacific Ocean and the Construction of the Panama Canal. Publisher Panama-Pacific international exposition Company. 1920. Vol. 4. P. 78—79.

Информация об авторе

Пестриков Виктор Михайлович, д. т. н., профессор Санкт-Петербургского государственного института кино и телевидения, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация. ORCID 0000-0003-0466-881X.

Success Business Plan for AT&T

V. M. Pestrikov

St. Petersburg State University of Film and Television
13, Pravda st. St. Petersburg, 191119, Russian Federation
pvm205@yandex.ru

Received: March 19, 2023

Peer-reviewed: March 30, 2023

Accepted: May 20, 2023

Abstract: It is shown that AT&T's purchase of patent rights to his audion from Lee de Forest in 1912 made the New York – San Francisco transcontinental telephone line project a reality. The features of the construction of this telephone line and the difficulties that arose in this case are considered. Attention is paid to the development of electrical circuits and designs of tube repeaters, as well as their installation on a telephone line. The principles of operation of tube repeaters of type 21 and 22 are analyzed. The results of the first testing of the line on July 29, 1914 are given. A memorable day was marked on January 25, 1915 – the day of the solemn launch of the transcontinental telephone line into commercial operation 25 days before the opening of the Panama-Pacific International Exhibition in San Francisco.

Keywords: Lee de Forest, New York – San Francisco transcontinental telephone line, tube repeater, type 21 repeater, type 22 repeater, Panama-Pacific International Exposition in San Francisco, Alice Faye.

For citation (IEEE): V. M. Pestrikov, "Success Business Plan for AT&T," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 6, no. 3, pp. 327–355, 2023, doi: 10.29039/2587-9936.2023.06.3.25. (In Russ.).

References

- [1] B. Gherardi and F. B. Jewett, "Telephone Repeaters," *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. XXXVIII, no. 2, pp. 1287–1345, Jul. 1919, doi: <https://doi.org/10.1109/t-aiee.1919.4765639>.
- [2] F. B. Jewett, "Dr. George A. Campbell," *Bell System Technical Journal*, vol. 14, no. 4, pp. 553–557, Oct. 1935, doi: <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1935.tb00701.x>.
- [3] C. A. Smith, "Fifty years of telephone repeaters," *Bell Laboratories Record*, vol. 27, no. 1, pp. 5–9, January 1949.
- [4] "Radiotelephony for Railroads," *Electrical World*, vol. 63, no. 22, p. 1269, May 30, 1914.
- [5] Lee de Forest. *Father of Radio. The Autobiography*. Chicago : Wilcox & Follett Co., 1950.
- [6] F. M. Todd, *The Story of the Exposition: Being the Official History of the International Celebration Held at San Francisco in 1915...* Publ. Panama-Pacific Intern Exposition Co. 1920. Vol. 4.

Information about the author

Viktor M. Pestrikov, Dr. Tech. Sc., Professor, St. Petersburg State University of Film and Television, St. Petersburg, Russian Federation. ORCID 0000-0003-0466-881X.

УДК 621.396(091)

Проект IEEE oral history: академик Ю. В. Гуляев. Часть 5

¹ Кондратова Е. В., ² Свиридова Е. И., ² Ермолов П. П.

¹ Черноморское высшее военно-морское училище имени П. С. Нахимова
ул. Дыбенко, д. 1а, Севастополь, Российская Федерация, 299028
elenakondratovaa@mail.ru

² Севастопольский государственный университет
ул. Университетская, д. 33, Севастополь, Российская Федерация, 299053

Получено: 14 марта 2023 г.

Отрецензировано: 24 марта 2023 г.

Принято к публикации: 24 марта 2023 г.

Аннотация: Статья представляет собой фрагменты интервью, взятого у академика Ю. В. Гуляева Центром истории IEEE в Горжье, Швейцария, 13 июля 2017 г. Из 14 разделов интервью в статье представлены следующие три: Саратовский институт, Углеродные нанотрубки и Проект «Экстрасенсы». В статье устранены библиографические несоответствия. Цель публикации — ознакомление в этой части профильного русскоязычного сообщества с основными положениями интервью.

Ключевые слова: Центр истории IEEE в Горжье, Саратовский институт (филиал Института радиотехники и электроники АН СССР), углеродные нанотрубки, сильная автоэмиссия электронов, исследовательский проект «Экстрасенсы».

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Кондратова Е. В., Свиридова Е. И., Ермолов П. П. Проект IEEE oral history : академик Ю. В. Гуляев. Часть 5 // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2023. Т. 6, № 3. С. 356—366.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Кондратова, Е. В. Проект IEEE oral history : академик Ю. В. Гуляев. Часть 5 / Е. В. Кондратова, Е. И. Свиридова, П. П. Ермолов // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2023. — Т. 6, № 3. — С. 356—366.

1. Введение

Концепт устной истории был популяризирован в США в 1940-е годы в связи с деятельностью американского журналиста Джо Гулда (*Joseph Ferdinand Gould*; 1889—1957), заявлявшего о своей работе над огромной

книгой «Устная история нашего времени», полностью составленной из записи рассказов разных людей. В 1948 году центр устной истории был открыт при Колумбийском университете. В 1967 году была создана Ассоциация устной истории США, двумя годами позже аналогичная организация появилась в Великобритании.

Не остался в стороне от этого тренда и IEEE — к настоящему времени американским Институтом инженеров электротехники и электроники собрано более 804 персональных устных истории. Подавляющее большинство персоналий в этом собрании — известные американские и «западные» специалисты. И, тем не менее, весьма значимым является то, что в этом списке появился известный российский ученый, академик Ю. В. Гуляев.

Интервью у российского академика для Центра истории IEEE взяли Виктор Плесски (*Victor Plessky*) и Клеменс Руппель (*Clemens Ruppel*) в Горжье, Швейцария (*Gorgier, Switzerland*) 13 июля 2017 г. (интервью № 784).¹

Это событие нашло некоторое отражение только в небольшом интервью на портале «Правда.Ру».²

Интервью состоит из 14 разделов:

- [Детство, семья];
- Образование;
- Диссертация под руководством проф. В. Л. Бонч-Бруевича;
- Советский Союз после Сталина;
- Изобретение встречно-штыревого преобразователя в 1965 г.;
- Заведующий лабораторией во Фрязино;
- Волны Блюстейна — Гуляева;
- Другие типы акустических волн;
- Изготовление устройств на ПАВ в Советском Союзе;
- Будущие разработки в области акустических волновых технологий;
- Друзья и награды;
- Саратовский институт;
- Углеродные нанотрубки;
- Исследования в области медицины.

Ранее [1], [2], [3], [4] были опубликованы фрагменты интервью, в которых были отражены такие разделы, как «Изобретение встречно-штыревого преобразователя в 1965 г.», «Волны Блюстейна — Гуляева», «Диссертация под руководством проф. В. Л. Бонч-Бруевича», «Советский Союз после Сталина», «Другие типы акустических волн», «Изготовление устройств на ПАВ в Советском Союзе», «Будущие разработки в области

¹ http://ethw.org/Oral-History:Yury_Gulyaev (дата обращения 13.07.2018).

² <https://www.pravda.ru/science/02-08-2017/1343721-gulyaev-0/> (дата обращения 13.07.2018).

акустических волновых технологий» и «Друзья и награды». В настоящей статье представлены еще три раздела швейцарского интервью: «Саратовский институт», «Углеродные нанотрубки» и проект «Экстрасенсы». Цель настоящей статьи — ознакомление в этой части профильного русскоязычного сообщества с основными положениями интервью.

2. Саратовский институт

Ruppel:

Юрий, у Института радиотехники и электроники (ИРЭ) было несколько институтов в разных местах. Одним из них был Саратовский институт.

Гуляев:

Одним из институтов Саратовского центра был филиал нашего Института радиотехники и электроники АН СССР (ИРЭ АН СССР).

В 1977—1985 годах большую часть времени я проводил в Саратове, выполняя как административную, так и научную работу. На промышленных предприятиях Саратова было организовано производство СВЧ-акустических линий задержки как на ОАВ (объемных акустических волнах), так и на ПАВ (поверхностных акустических волнах), в том числе дисперсионных и компрессионных фильтров на ПАВ, по техническому уровню аналогичных фильтрам, выпускавшимся в то время, скажем, на *Thomson CSF*. Существовавшая в то время в мире так называемая «холодная война» ускорила производство этих компонентов.

В Саратовском отделении нашего института я организовал отличный коллектив ученых и инженеров (получивших образование в Саратовском университете и Саратовском политехническом институте), которые по своей квалификации были на лучшем мировом уровне. Уровень других саратовских институтов тоже был очень высок, не ниже московского или ленинградского. Мой заместитель руководителя Саратовского научного центра проф. А. Ф. Резчиков, помогавший мне в создании Центра, возглавлял прекрасный Институт точной механики и систем управления, работы которого имели большое значение для всей страны.

В то время в связи с продолжающейся «холодной войной» саратовские институты, помимо сельскохозяйственного и биологического, были секретными. Принимать иностранных коллег они не могли, их публикации в открытых журналах отправляли в печать через Институты аналогичного профиля в Москве или Ленинграде. Например, наш Институт радиотехники и электроники (ИРЭ) имел отделения во Фрязино и Саратове (а позже и в Ульяновске), которые по количеству ученых были сопоставимы с цен-

тральным институтом в Москве. Но все публикации присылались строго из Центрального института. Наши зарубежные коллеги были удивлены такой выдающейся продуктивностью наших ученых!

Саратов вообще был закрытым городом для иностранцев, так как во время Великой Отечественной войны в Саратов были эвакуированы многие военно-промышленные предприятия, и некоторые из них не вернулись на прежние места. В Саратове не останавливались даже туристические суда с иностранцами, которые путешествовали по Волге в 60-х и 70-х годах!

Все это изменилось с горбачевской «перестройкой», но об этом позже.

3. Углеродные нанотрубки

Ruppel:

Расскажите нам немного об открытии углеродных нанотрубок!

Гуляев:

В 1991 году было открыто новое аллотропное состояние углерода, так называемые нанотрубки. Это было дальнейшее развитие известного «фуллеренового» состояния — шарообразных молекул со многими атомами С, например C_{60} . Первые соображения о топологической возможности существования углеродных нанотрубок я услышал в 1991 году от проф. Леонида Чернозатонского, моего друга по Институту химической физики РАН, учителя моей жены Ирины Ермолаевой. Он называл их «туберелинами». Экспериментально эти углеродные нанотрубки³ были получены практически одновременно в 1991 году Иидзимой в электродуговом разряде и Чернозатонским и др. путем лазерного распыления графитового источника [5]. Экспериментатором в команде была Зоя Косаковская, блестящий ученый и инженер, красивая и приятная женщина. Я немедленно в 1991 году отправил результаты ее эксперимента [6] Крото, лауреату Нобелевской премии за открытие фуллеренов, и он пообещал поместить их в свою обзорную статью, которую писал для журнала «*Nature*».

Поскольку с 1980 года я занимался в Саратове исследованиями в области вакуумной микроэлектроники, у меня возникла идея, что углеродные нанотрубки могут быть эффективным и надежным источником эмиссии электронов в вакуум. Действительно, диаметр нанотрубки (или толщина ее стенки) равен размеру одного атома, поэтому у нее очень острый кончик. Если из-за очень сильного электрического поля некоторые атомы углерода будут отходить, острота нанотрубки не будет хуже — в отличие от использовавшихся ранее молибденовых наконечников, которые после отхождения некоторых атомов становятся более тупыми. Эту мысль я высказал руково-

³ Chernozatonsky L. A. 1991, Private Comm.; Physics Lett. 1992. T. A166. C. 55.

дителю моей экспериментальной группы в Саратовском отделении ИРЭ профессору Николаю Синицыну, известному специалисту в области СВЧ-электроники вообще и СВЧ-микроэлектроники в частности. Он немедленно организовал эксперимент и (о, слава!) действительно получил очень сильную автоэмиссию электронов с кончиков углеродных нанотрубок. В апреле 1993 года мы представили наш доклад на Международной конференции в Гренобле⁴.

Это была первая публикация об автоэмиссии электронов из углеродных нанотрубок и начало нового направления в вакуумной микроэлектронике. Сегодня в мире сотни публикаций на эту тему, и уже сделано много устройств. Например, уже созданы микровакуумные диоды и триоды, в которых расстояние между катодом (углеродная нанотрубка) и анодом меньше длины свободного пробега электрона при атмосферном давлении. Это значит, что его не нужно откачивать! Уже производятся микровакуумные интегральные схемы, которые могут работать в условиях очень сильного излучения или молнии, при высоких температурах и т. д. — в отличие от обычных полупроводниковых ИС. Другим преимуществом является очень высокая рабочая частота, так как электроны там свободны и не сталкиваются с атомами. Продолжают активно работать в области вакуумной микро- и наноэлектроники, исследуя, в частности возможности создания новых типов ярких дисплеев [7], [8].

4. Проект «Экстрасенсы»

Plessky:

Как вы оказались вовлечены в странный исследовательский проект «Экстрасенсы»?

Гуляев:

В 1977 году акад. Ю. Б. Кобзарев, выдающийся ученый в области электродинамики и статистической радиофизики, заведующий отделом нашего института, пригласил меня в гости к акад. И. К. Кикоину, одному из создателей русской атомной бомбы. Также были приглашены акад. А. Н. Тихонов, известный математик, автор «метода регуляризации Тихонова», профессор МГУ В. Б. Брагинский, выдающийся физик-экспериментатор в области гравитационных волн, проф. Г. Д. Мансфельд из моей лаборатории, блестящий экспериментатор в области акустоэлектроники, и еще несколько человек. Была приглашена ленинградка Нинель Кулагина с мужем и врачом. Ее объявили так называемым «экстрасенсом», человеком, обладающим не-

⁴ Gulyaev Yu. V., Chernozatontsev L. A., Kozakovskaya Z. Ya., Sinitsyn N. I., Torgashev G. V., Zakharchenko Yu. F. Revus "Le Vide les Conches Mince", Supplement N271-Mars-Apr 1994 (Submitted in 1993).

обычными способностями: телепатией, внутренним зрением (интровидением), телекинезом (замена предметов без прикосновения к ним) и т. д.

Здесь надо сказать, что в то время (конец брежневского «застоя» в СССР, конец 70-х — начало 80-х) такие люди стали очень популярны, т. к. советские люди не знали, куда идти. Идея коммунизма была исчерпана, но альтернативной идеологии предложено не было. Итак, всевозможные экстрасенсы, колдуны, экзорцисты, шаманы, целители, астрологи, ведьмы процветали и «пудрили людям мозги».

Все это истинные ученые считали просто чушью и не хотели обращать на это внимания. Но некоторые ученые хотели пойти глубже и понять, есть ли что-то, что стоит изучать (чтобы не «выплеснуть ребенка вместе с водой из тазика»). Это и было целью упомянутой выше встречи в доме у акад. Кикоина.

На стекло над столом кто-то клал легкие предметы (ключья бумаги, стаканчик с ручкой) и просил госпожу Кулагину двигать их, не касаясь. Она попыталась с большим усилием и... ничего не произошло, предметы не двигались. Она сразу сказала что на нее влияют глаза детей с фотографий, внуков Кикоина, под стеклом над столом. Итак, стекло стола было заклеено газетой. Она повторила усилия, и наконец, предметы начали двигаться (!), как к ней, так и от нее в зависимости от положения ее рук. Все мы, зрители, были в огромном шоке! Акад. Тихонов даже пытался измерить линейкой путь, пройденный предметом. Было около 25 см. Мы очень внимательно следили за ее руками и предметами и не заметили никаких ниток или других приспособлений. Казалось, это был не фокус! Но что это было?

Мы все были учеными и не верили ни в какие чудеса! Все начали предлагать объяснения увиденному. Моя идея заключалась в том, что от ее рук исходит какое-то химическое излучение, так как она всегда держала раскрытые ладони над предметами, как будто сбрасывала какое-то вещество из своих ладоней на предметы. Движения предметов более или менее следовали за движениями ее ладоней, как будто между ладонями и предметами было какое-то взаимодействие. Другим эффектом, который она производила, было сильное травление кожи любого человека, когда она касалась какого-либо участка кожи ладонью. Проф. Брагинский даже получил заметный ожог руки от ее прикосновения. Во время всех экспериментов врач измерял ей пульс и артериальное давление. Оно достигало очень высокого уровня: 200 ударов сердца в минуту и 270 мм рт. ст. артериального давления. В конце концов она была полностью истощена. Мы вернулись домой в глубоких раздумьях, чем все это могло быть. Так или иначе, мне было интересно понять, что я увидел: действительно ли это какой-то феномен или очень хитрый трюк? Я навел справки о Кулагиной и узнал, что с ней общался акад. Рем Хохлов, ректор МГУ. К сожалению,

Хохлов на тот момент уже умер, но очевидцы говорили, что Кулагина могла рассеивать лазерный луч! Мы решили повторить его эксперименты: сделали из картона вертикальную трубку диаметром 10 см с двумя парами отверстий по диаметру, одна пара над другой на 5 см, и пропустили через эти пары лазерный луч. На дно этой трубки поместили небольшой пьезоэлектрический преобразователь (приемник звука).

Мы пригласили Кулагину снова приехать в Москву и попросили ее переместить этот преобразователь внутрь трубки. Когда Кулагина положила ладони на верхнее отверстие трубки и начала двигать преобразователь, мы увидели, что лазерные лучи стали дрожать и разлетаться один за другим, а пьезодатчик регистрировал звуковые импульсы. Словно какие-то «облака» падали с ее ладоней с определенной скоростью, рассеивали лазерные лучи, а затем производили звуковые импульсы, регистрируемые датчиком. Зная расстояние между лазерными лучами, мы легко рассчитали скорость «облаков» и нашли, что она примерно равна скорости капель воды, свободно падающих в атмосферу. Так нам стало более-менее ясно, что картина «явления» была такова: она каким-то образом могла выбрасывать из ладоней облачка пота, имеющие электрический заряд. Эти облака на своем пути вниз рассеивают лазерные лучи и, падая на преобразователь, производят звуковые импульсы. Датчик становится электрически заряженным, и ладони Кулагиной, которые также заряжены, могут двигать объект (преобразователь), не касаясь его, обычной электродвижущей силой.

Известно, что кожа человека (в том числе ладоней) обычно электрически заряжена за счет трения наших ног об пол, землю и т. п. Часть этого заряда Кулагина может выбрасывать с потом на предмет, который при этом становится заряженным. Действительно, мы заметили, что ее ладони после экспериментов были очень влажными. Таким образом, так называемый «телекинез» объясняется просто электродвижущими силами! Мы даже сделали прибор, который назвали «ведьмоскопом», для прямого измерения электрического заряда, который Кулагина выбрасывала из ладоней. Он состоял из двух металлических пластин, расположенных параллельно друг другу с расстоянием между ними около 5 см. Эти пластины были включены в цепь, состоящую из электрической батареи, амперметра и вольтметра, соединенных между собой проводами. В отсутствие Кулагиной ток в цепи был равен нулю и вольтметр показывал напряжение аккумулятора. Когда Кулагина начала выбрасывать в пространство между пластинами облака своего заряженного пота (на самом деле облака какого-то электролита), возник ток. Зная размеры пластин и величину тока, можно легко рассчитать величину электрического заряда между пластинами. Это-

го оказалось вполне достаточно, чтобы обеспечить необходимую электро-движущую силу для «телекинеза».

Вопрос в том, почему у нее был такой обильный пот с ладоней. Возможно, это ее физиологическая особенность. Всем известно, что некоторые люди потеют больше, чем другие. Но у нас даже была мысль, что, может быть, она перед опытами растирала себе в ладонях какие-то химические вещества. Это могло бы объяснить упомянутую выше гравировку ее ладоней: так просто! Во всяком случае, из деликатности мы не исследовали эти эксперименты так подробно. К сожалению, госпожа Кулагина вскоре умерла, и у нас не было возможности продолжить эксперименты. Мы узнали, что некоторые другие люди демонстрировали подобный тип «телекинеза», но они отказались от научного исследования. Вот и завершились наши эксперименты с «телекинезом».

О результатах наших экспериментов с госпожой Кулагиной я сообщил нашему директору акад. В. А. Котельникову (он был вице президентом АН СССР) и, по его совету, президенту АН СССР акад. А. П. Александрову и на семинаре в Институте физических проблем Академии наук СССР. Все они приняли наше возможное объяснение «телекинеза». Но вопрос о физиологическом механизме столь обильного заряженного человеческого пота (даже если он обусловлен искусственным втиранием в ладони каких-то химических веществ) до конца не решен. Однако положительным итогом этой истории для меня стало появление интереса к изучению физиологических функций человека радиофизическими методами. Должен сказать, что до сих пор все эксперименты с Кулагиной проводились неофициально, в основном у меня дома. Но вскоре представился случай, который помог перенести наши опыты в официальную лабораторию.

В конце 1980 г. председатель Государственного комитета по науке и технике (ГКНТ) акад. Г. И. Марчук пригласил акад. Евгения Велихова, занимавшего в тот период должность вице-президента Академии наук СССР по физике и меня, как заместителя директора института, деятельность которого была связана с приемом и обработкой слабых сигналов при наших исследованиях космоса и планет радиолокаторами и спутниками. Например, наш институт участвовал в радиолокационных исследованиях планеты Венера. Мы составили первую карту рельефа Венеры, несмотря на то, что облака в ее атмосфере всегда покрывают поверхность планеты. Год спустя американские ученые выполнили аналогичное радиолокационное картирование Венеры. Об этих достижениях я вместе с американскими коллегами сообщил через американское телевидение *CNN*. Также мои эксперименты с Кулагиной были достаточно известны и акад. Марчук знал о них. Он сообщил нам, что Генеральный секретарь ЦК КПСС Лео-

нид Брежнев просил его прояснить ситуацию с женщиной ассирийского происхождения по имени «Джуна», которая занимается лечением нескольких высших руководителей СССР и его самого (с положительным эффектом!) методами, не одобренными официальной медициной. Марчук попросил нас организовать исследования «целебных» способностей Джуны с точки зрения физики. Мы согласились попробовать.

5. Заключение

Интервью, взятое у академика Ю. В. Гуляева Центром истории IEEE — свидетельство мирового признания его научных достижений. Не рассмотренные в настоящей статье фрагменты интервью представляют интерес для дальнейшего ознакомления профильного русскоязычного сообщества с основными его положениями.

Список литературы

1. Ермолов П. П. Проект IEEE oral history : академик Ю. В. Гуляев. Часть 1. В кн.: 28-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» — КрыМиКо'2018 (Севастополь, 9—15 сент. 2018 г.). 2018. С. 1827—1834.
2. Ермолов П. П., Коломийченко В. П., Свиридова Е. И. Проект IEEE oral history: академик Ю. В. Гуляев. Часть 2 // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2019. Т. 2, № 2. С. 257—263.
3. Кондратова Е. В., Коломийченко В. П. Проект IEEE oral history : академик Ю. В. Гуляев. Часть 3 // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2023. Т. 6, № 1. С. 108—114.
4. Кондратова Е. В., Коломийченко В. П. Проект IEEE oral history : академик Ю. В. Гуляев. Часть 4 // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2023. Т. 6, № 2. С. 250—259.
5. Iijima S. Helical microtubules of graphitic carbon // Nature. Nov. 1991. Vol. 354, no. 6348. P. 56—58.
6. Kosakovskaya Z. Ya., Chernozatonskii L. A., Fedorov E. A. Nanofilament Carbon Structure // JEPT Letters. 1992. Vol. 56, iss. 1. P. 26—30.
7. Gulyaev Yu. V. Field emitter arrays on nanotube carbon structure films // Journal of Vacuum Science & Technology B : Microelectronics and Nanometer Structures. Mar. 1995. Vol. 13, no. 2. P. 435.
8. Гуляев Ю. В. Углеродные нанотрубные структуры — новый материал для эмиссионной электроники // Вестник РАН. 2003. Т. 73, № 5. С. 389—391.

Информация об авторах

Кондратова Елена Васильевна, доцент кафедры физики и общетехнических дисциплин ЧВВМУ им. П. С. Нахимова, Севастополь, Российская Федерация.

Свиридова Елена Игоревна, преподаватель базовой кафедры «Инновационная радиоэлектроника», Севастопольского государственного университета, Российская Федерация.

Ермолов Павел Петрович, заведующий базовой кафедрой «Инновационная радиоэлектроника» Севастопольского государственного университета, Российская Федерация. ORCID: 0000-0001-9089-974X.

IEEE oral history project: Academician Yu. V. Gulyaev. Part 5

Ye. V. Kondratova¹, Ye. I. Sviridova², and P. P. Yermolov²

¹Black Sea Higher Naval School n. a. P. S. Nakhimov
1a, Dybenko Str., Sevastopol, Russian Federation, 299028
elenakondratovaa@mail.ru

²Sevastopol State University

Received: March 14, 2023

Peer-reviewed: March 24, 2023

Accepted: March 24, 2023

Abstract: The article is excerpts from an interview conducted with Academician Yu. V. Gulyaev by the IEEE History Center in Gorgier, Switzerland, July 13, 2017. Of the 14 sections of the interview, the article presents the following three: Saratov Institute, Carbon Nanotubes, and the “Psychics” Project. The article eliminated bibliographic inconsistencies. The purpose of the publication is to familiarize this part of the profile Russian-speaking community with the main provisions of the interview.

Keywords: IEEE History Center in Gorzhye, Saratov Institute (a branch of the Institute of Radio Engineering and Electronics of the USSR Academy of Sciences), carbon nanotubes, strong field emission of electrons, research project “Psychics”.

For citation (IEEE): Ye. V. Kondratova, Ye. I. Sviridova and P. P. Yermolov, “IEEE oral history project : Academician Yu. V. Gulyaev. Part 5,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 6, no. 3, pp. 356–366, 2023, doi: 10.29039/2587-9936.2023.06.3.30. (In Russ.).

References

- [1] P. P. Yermolov, “IEEE oral history project : Academician Yu. V. Gulyaev. Part 1,” in 28th *International Conference “Microwave & Telecommunication Technology”*, Sevastopol, 2018, pp. 1827–1834. (In Russ.).
- [2] P. P. Yermolov, V. P. Kolomiychenko, and Ye. I. Sviridova, “IEEE oral history project : Academician Yu. V. Gulyaev. Part 2,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 2, no. 2, pp. 257–263, 2019. (In Russ.).
- [3] Ye. V. Kondratova and V. P. Kolomiychenko, “IEEE oral history project : Academician Yu. V. Gulyaev. Part 3,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 6, no. 1, pp. 108–114, 2023, doi: 10.29039/2587-9936.2023.06.1.10. (In Russ.).
- [4] Ye. V. Kondratova and V. P. Kolomiychenko, “IEEE oral history project : Academician Yu. V. Gulyaev. Part 4,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 6, no. 2, pp. 250–259, 2023, doi: 10.29039/2587-9936.2023.06.2.20. (In Russ.).
- [5] S. Iijima, “Helical microtubules of graphitic carbon,” *Nature*, vol. 354, no. 6348, pp. 56–58, Nov. 1991, doi: <https://doi.org/10.1038/354056a0>.

- [6] Z. Ya. Kosakovskaya, L. A. Chernozatonskii, and E. A. Fedorov, “Nanofilament Carbon Structure,” *JEPT Letters*, vol. 56, iss. 1, pp. 26–30, 1992.
- [7] Yu. V. Gulyaev, “Field emitter arrays on nanotube carbon structure films,” *Journal of Vacuum Science & Technology B : Microelectronics and Nanometer Structures*, vol. 13, no. 2, p. 435, Mar. 1995.
- [8] Yu. V. Gulyaev, “Carbon nanotube structures as a new material for emission electronics,” *Vestnik RAN*, vol. 73, no. 5. pp. 389–391, 2003. (In Russ.).

Information about the authors

Yelena V. Kondratova, Associate Professor at the Department of Physics and General Engineering, Black Sea Higher Naval School n. a. P. S. Nakhimov, Sevastopol, Russian Federation.

Elena I. Sviridova, lecturer at the basic department “Innovative radio electronics”, Sevastopol State University, Russian Federation.

Pavel P. Yermolov, head of the basic department “Innovative radio electronics”, Sevastopol State University, Russian Federation. ORCID: 0000-0001-9089-974X.

ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫЕ И РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал

Том 6, № 3, 2023 г.

Рубрики в соответствии с номенклатурой научных специальностей:

Физические науки (1.3)

Электроника, фотоника, приборостроение и связь (2.2)

История науки и техники (5.6.6)

Адрес редакции:

ул. Университетская, д. 33, Севастополь, 299053

Тел. редакции: (8692) 41-77-41

<http://icrtjournal.com>

E-mail: icrt.mail@mail.ru

Отпечатано в типографии Printex

ул. Кулакова, д. 59а, Севастополь, 299011

Тел.: (8692) 46-47-44, (8692) 45-56-78

Публикуемые материалы прошли обязательную процедуру рецензирования и экспертного отбора. Авторы опубликованных материалов несут полную ответственность за подбор и точность приведенных фактов, цитат, данных, имен собственных и прочих сведений.

Редакция не несет ответственности за нарушение авторами исключительных прав на результаты интеллектуальной деятельности третьих лиц. Мнение редакционной коллегии может не совпадать с позицией авторов статей. При перепечатке материалов ссылка на научный журнал «Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии» обязательна.

Учредитель

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»

ул. Университетская, 33, Севастополь, 299053

Издатель

ООО «Издательский центр РИОР»

ул. Полярная, д. 31в, стр. 1, Москва, 127214

№ рег. СМИ: ПИ № ФС77-64134 от 25.12.2015

Главный редактор: Вольвач А. Е.

